

温度上昇を抑制するコンクリートおよびモルタルの  
研究・開発

2013 年 7 月

高 橋 篤 史

## 論文要旨

都心部において土地の高度利用が進み建物が高密度化するとともに、密集した市街地が郊外にまで広がり緑地や水面が減少しヒートアイランド現象が起きている。

ヒートアイランド現象は社会問題となっており現在ではその対策として保水性建材を使用する方法が有効な手段となっている。ポーラスコンクリートは保水性建材の一種であるが、現状では空隙部が大きく蓄えた水分がすぐに流出し、蒸発による温度上昇抑制効果が数時間程度しか持続しないという問題がある。

そこで保水性能の高い活性アルミナボールを使用したモルタルや活性アルミナ粉末を使用したモルタルの2層構造の特殊平板供試体を作成し屋外曝露試験、ハロゲンライト照射試験を行い気化熱がモルタル平板供試体に与える影響を測定した研究結果を得た。

本研究では、上記の研究結果から活性アルミナ粉末混入モルタルを使用する建屋と普通のコンクリートを用いた建屋の各建屋での比較実証試験による温度上昇抑制効果の検証、時間による保水量低下の性能劣化を調べるため測定期間中連続して晴天が続いた 6 日間の測定と活性アルミナ粉末入りモルタル作製時の高 W/C 化により懸念される乾燥収縮についての長さ変化試験、モルタル内部のポーラス化で発生した細孔が与える耐凍害性を簡易凍結融解試験などの活性アルミナ粉末混入モルタルの耐久性に関する実験を行った。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- (1) 6 日間連続で測定したデータから活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は常に白色セメントモルタル建屋より温度が低くなっていることから、太陽からの熱量による含水の蒸発以外の含水量のロスを減らし性能を維持していることがわかる。
- (2) 総細孔量は W/C と活性アルミナの量に比例して増加しており、モルタルのポーラス化が起きていることが確認できる。
- (3) 高 W/C のモルタルを作製するとき活性アルミナ粉末を混入しない場合は材料分離を起こす。よって、W/C ごとに施工に適した活性アルミナ粉末混入量を調整することで高 W/C であっても成形を可能になる。これは、活性アルミナ粉末を混入したことで材料分離を制御し、微細な連続空隙を造ることができたためである。
- (4) 吸水高さ測定から、活性アルミナ粉末混入量および W/C の増加に伴い吸水高さが高くなる。これより連続した内部空隙の存在を明らかにした。

## 目次

### 第1章 序論

1.1 本研究の背景	1
1.1.1 ヒートアイランド現象	1
1.1.2 ヒートアイランド現象対策の現状	3
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	5
参考論文	6

### 第2章 保水性コンクリートの実情と温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究

2.1 保水性コンクリート研究の現状	7
2.2 保水性コンクリートの実情と骨材	7
2.2.1 保水性舗装の概念と現状の問題点	7
2.2.2 保水性コンクリートの性能向上に使用されている骨材	10
2.2.3 活性アルミナ	11
2.2.4 粉末の活性アルミナ製造方法	11
2.3 温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究	15
2.3.1 ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果	15
2.3.2 温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発	16
2.3.3 ヒートアイランド現象を抑制する多孔質保水瓦の基礎的特性	17
2.3.4 温度上昇抑制効果能力をコンクリートに付与するモルタルの開発	18
2.4 既往の研究と本研究の関係	24
参考論文	26

### 第3章 活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認

3.1 初めに	27
3.2 特殊平板（粉体）の製作	27
3.3 ハロゲンライト照射試験	28
3.3.1 測定準備と測定方法	28
3.3.2 照射試験の妥当性の検討	29
3.4 ハロゲンライト照射試験結果	29
3.5 結論	33
参考文献	33

## 第 4 章 温度上昇抑制効果を持つモルタルの実証試験と保水のメカニズムの確認

4.1	初めに	34
4.2	実験概要	34
4.2.1	実験の構成及び使用材料	34
4.2.2	実証試験	34
4.2.3	試験建屋	36
4.2.4	測定期間と測定方法	36
4.3	内部空隙の確認	38
4.3.1	細孔径分布試験	38
4.3.2	光学顕微鏡	39
4.3.3	走査型電子顕微鏡	39
4.3.4	見掛気孔率の測定	40
4.4	内部空隙と水分移動	40
4.4.1	活性アルミナ粉末混入モルタルの作製方法	40
4.4.2	保水性試験	40
4.4.3	吸水性試験	41
4.4.4	吸上げ高さ試験	42
4.5	実証試験結果と考察	42
4.5.1	建屋測定結果	42
4.5.2	モルタルの細孔分布測定	50
4.5.3	光学顕微鏡結果	53
4.5.4	走査型電子顕微鏡結果	53
4.5.5	見掛気孔率の測定	54
4.5.6	保水性試験結果	55
4.5.7	吸水性試験結果	56
4.5.8	給水高さ測定結果	58
4.6	結論	60
	参考論文	60

## 第 5 章 活性アルミナを混入したモルタルの耐久性の検討

5.1	初めに	61
5.2	圧縮強度試験、曲げ強度試験概要	61
5.2.1	圧縮強度試験、曲げ強度試験で使用したモルタルの配合	61
5.2.2	活性アルミナ粉体モルタル作成	62
5.2.3	圧縮強度試験、曲げ強度試験	62



5.2.4	圧縮強度試験、曲げ強度試験結果	62
5.3	長さ変化試験概要	65
5.3.1	長さ変化試験で使用したモルタルの配合	65
5.3.2	長さ変化試験	65
5.3.3	長さ変化試験結果	66
5.4	簡易凍結融解試験概要	67
5.4.1	簡易凍結融解試験で使用したモルタルの配合	67
5.4.2	簡易凍結融解試験	67
5.4.3	簡易凍結融解試験結果	69
5.5	結論	69
	参考論文	69
6 章	結論	
6.1	3 章の活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認	70
6.2	4 章の活性アルミナを混入したモルタルを使った建屋の性能	70
6.3	5 章の活性アルミナを混入したモルタルの耐久性の検討	71
6.4	今後の展望と課題	72
	謝辞	75

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

#### 1.1.1 ヒートアイランド現象

近年ヒートアイランド現象は社会問題となっている。ヒートアイランド現象とは、都市の中心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象であり、年間を通じて生じているが、特に夏季の気温上昇が都市生活の快適性を低下させるとして問題となっている。都心周辺で $30^{\circ}\text{C}$ 以上となる時間数は、1980年代前半には、年間200時間程度だったが、最近では20年前の約2倍になり、その範囲も郊外へ広がった。図-1.1に関東地方における $30^{\circ}\text{C}$ 以上の合計時間分布を示す。

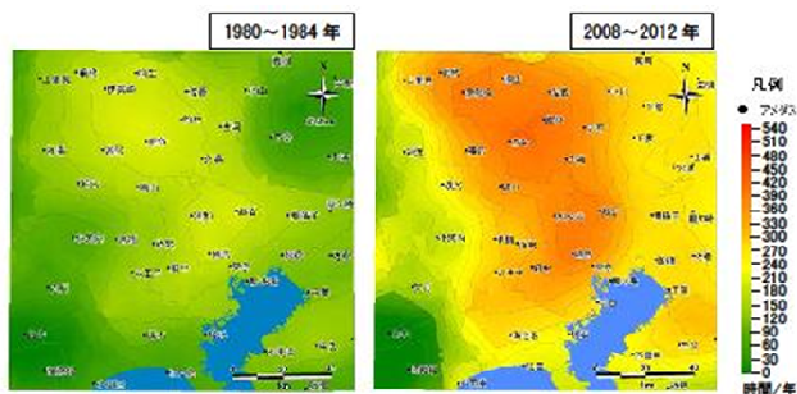


図-1.1 関東地方における  $30^{\circ}\text{C}$ 以上の合計時間数の分布(5年間の年間平均時間数)<sup>1-1)</sup>

世界の平均気温は、ここ100年で約 $0.7^{\circ}\text{C}$ 上昇しており、地球温暖化が主な原因と考えられている。図-1.2に示すように、日本の大都市の平均気温はこの100年あたりで $2.2^{\circ}\text{C}$ ～ $3.0^{\circ}\text{C}$ 上昇している。地球温暖化による気温上昇にヒートアイランド現象がもたらす気温上昇が加わって、急速に都市の温暖化が進んでいると言える。

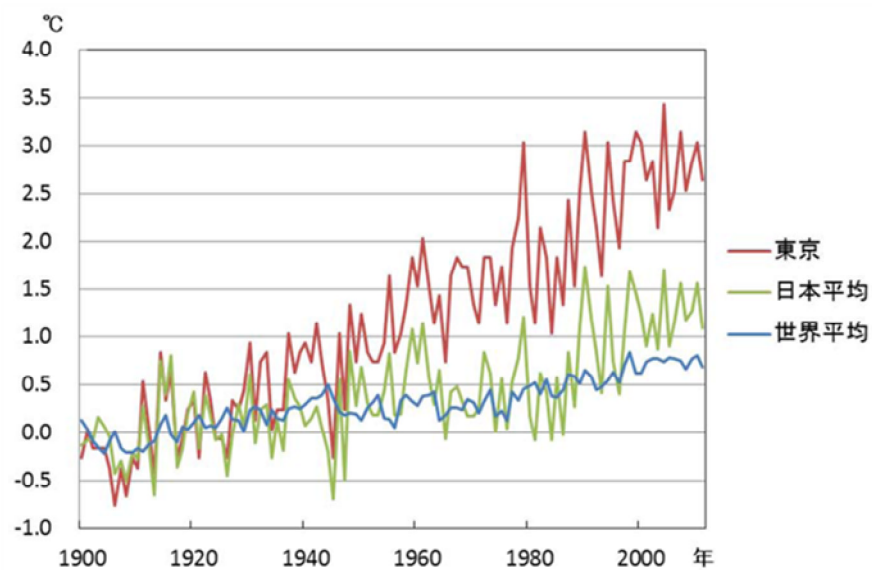


図-1.2 東京と世界の年平均気温の経年変化<sup>1-1)</sup>

資料) 気象庁HP掲載データより作成

注: 1900 年から 1929 年の 30 年間を基準としてグラフを作成

ヒートアイランド現象の主な原因は、人工排熱の増加（建物や工場、自動車などの排熱）、地表面被覆の人工化（緑地の減少とアスファルトやコンクリート面などの拡大）、都市形態の高密度化（密集した建物による風通しの阻害や天空率の低下）の3つが挙げられる。

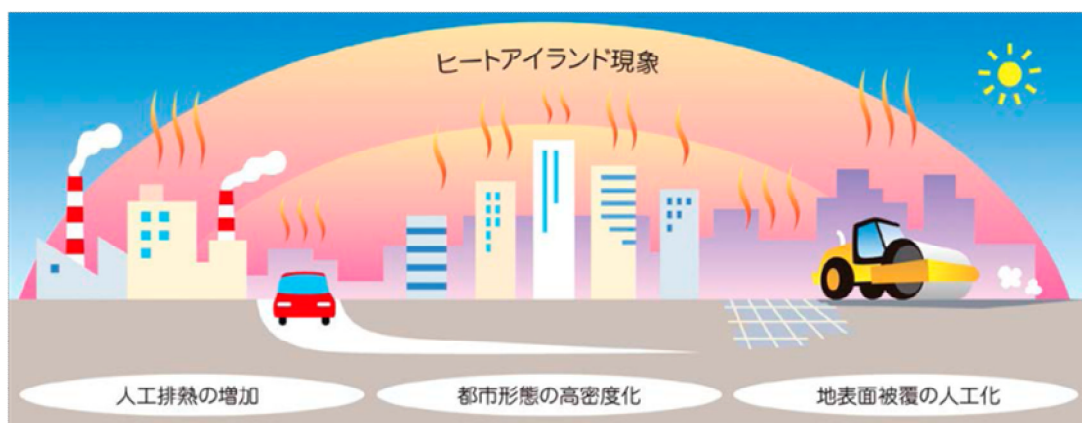


図-1.2 ヒートアイランド現象の原因<sup>1-1)</sup>

その中の地表面被覆の人工化は、緑地が減り、アスファルトやコンクリートなどの人工的な被覆面が増えることにより、特に夏季には地表面の温度が上昇する。図-1.3に地表面の状態と気温の関係を示した。アスファルトやコンクリートは、日射を受けることにより、夏季の日中には表面温度が50～60℃程度にまで上昇し、大気を加熱します。また、アスファルトやコンクリートは日中に蓄えた熱を夜まで持ち越すため、夜間の気温低下を妨げ熱帯夜になる。植物は葉の表面から蒸散を行っており、日射により受けたエネルギーを潜熱として大気中に放出するため、大気を暖める要因にはならない。また、樹冠の大きな木は日射を遮ることにより、地表面温度の上昇を抑制します。さらに、まとまった緑地は都市を冷やす冷熱源としての効果がある。

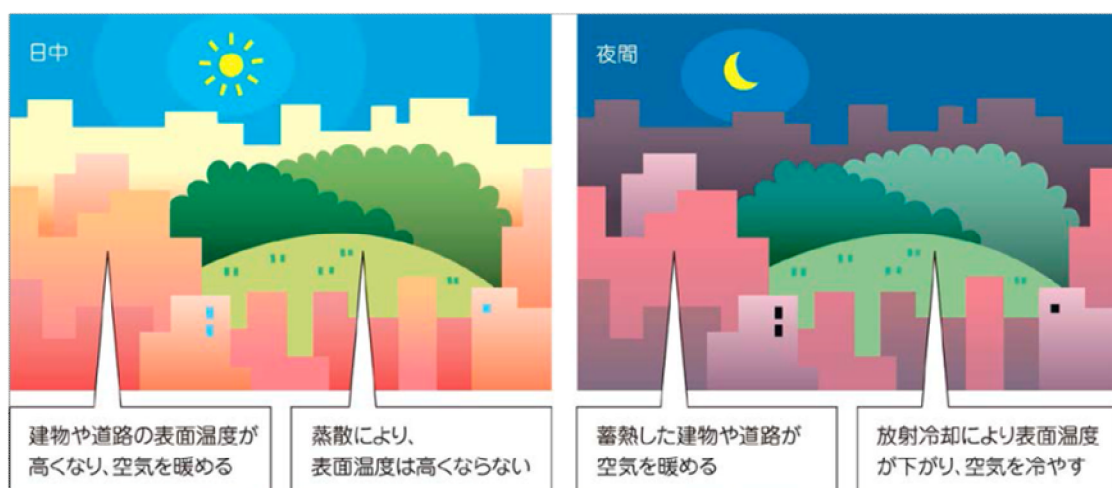


図-1.3 地表面の状態と気温の関係<sup>1-1)</sup>

### 1.1.2 ヒートアイランド現象対策の現状

ヒートアイランド現象を生じさせないよう、その原因を削減する対策、これを緩和策と呼んでいる。これまでのヒートアイランド対策は主にこの緩和策が進められており、人工排熱の低減、地表面被覆及び都市形態の改善、ライフスタイルの改善に取り組まれています。ヒートアイランド現象が長期間に渡って累積してきた都市化全体と深く結びついていることから、このような緩和策を長期的に継続して導入していく必要があり、実行可能なものから対策が進められている。

緩和策のうち、地表面の温度上昇を低減するには、緑化の他にも地表面の保水化や打ち水などといった水の活用や、日射を反射させることにより地表面が蓄える熱を減らす方法がある。地表面の保水化の技術では保水性舗装、保水性建材を使用する方法が有効な手段となっている。保水性舗装には、アスファルト舗装系保水性舗装、コンクリート舗装系保水性舗装、ブロック舗装系保水性舗装の3種がある。ポーラスコンクリートはコンクリート舗装系保水性舗装であるが、現状では空隙部が大きく蓄えた水分がすぐに流出し、蒸発による温度上昇抑制効果が数時間程度しか持続しないという問題がある。対策として保水性建材としてのポーラスコンクリートの保水維持機能を高める方法として空隙中に吸水性樹脂を注入したポーラスコンクリートが提案開発されている<sup>1-2)1-3)</sup>。

ヒートアイランド現象対策は原因である人工排熱の増加、地表面被覆の人工化、都市形態の高密度化に応じて多くの対策を研究・開発されているが大きな成果が得られていないのが現状である。それに伴い、私たちの健康や生活、動植物などに様々な影響が生じている。人の健康に対しては夏季における気温の上昇が深刻な影響を与えるが、ヒートアイランド現象による影響は年間を通じて発生している。例えば、秋には紅葉が遅れ、暖かい冬には植物の休眠に悪影響を与えるなど、生態系にも影響を及ぼしている。ヒートアイランド現象対策の向上は急務となっている。

## 1.2 本研究の目的

コンクリートを使うヒートアイランド現象対策として保水性建材があるが保水されている水は1日～3日の内に蒸発してしまい長期間の遮熱効果が期待できないという問題がある。この問題を解決する方法として機械による水分の補給<sup>1-4)</sup>やコンクリートの下に水を這わし毛細管現象を利用して水を吸い上げるなどがあるがコストなどの問題から広く普及されていない。また、熱の反射を利用したコンクリート平板もあるが、気化による吸熱にくらべるとやや効果が劣っている。

そこでヒートアイランド現象対策に使用するコンクリートに保水性建材を選び研究した。水分の蒸発を防ぎ、保水性能を向上させるため、コンクリートに

水分の吸着能力を持ち保水能力の高い材料である活性アルミナを混入したモルタルを製作し塗りつけ2層構造とした。製作したモルタルは従来の保水性建材より保水性の向上、気化による吸熱効率は向上したがモルタルの強度が従来のものより弱くなる結果を得た。そこで、モルタルの耐久性の検討、モルタルを使用した建屋を使い温度上昇抑制効果が実際にどのような影響を与えるかの測定試験、モルタルに起きている空隙を確かめる検討を本研究の目的とする。

### **1.3 本論文構成**

本論文は下記のように5章から構成する。

#### **第1章「序論」**

本章では、研究の背景および目的と、本論文の構成をまとめた。

#### **第2章「保水性コンクリートの実情と温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究」**

本章では、日射によるコンクリートの温度上昇を抑制する性能を持つ保水性コンクリートの保水する水分を長期間維持するために保水性の性能が高い活性アルミナボールを混入した特殊平板（ボール）を製作した。温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究から温度上昇抑制効果を測定する方法を検討した。次に、保水性コンクリートが気化熱による温度上昇抑制効果がどのように働いているかを調べた。

#### **第3章「活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認」**

本章では、第2章で製作した特殊平板（ボール）は、製造方法が特殊で手間がかかる、活性アルミナボールは非常に高価であることから、活性アルミナボールではなく活性アルミナ粉末を使用した特殊平板（粉体）を製造し、ハロゲンライト照射試験を行った。

#### **第4章「活性アルミナを混入したモルタルを使った建屋の性能」**

本章では、第3章で製作した特殊平板（粉体）の基層のモルタルを実際に建屋の屋根に塗ることにより建屋の屋根や内部の温度にどのような影響が出ているのかを調べた。また、特殊平板（粉体）の細孔径分布、走査型電子顕微鏡、各種内部空隙の確認試験を行った。

## 第5章「活性アルミナを混入したモルタルの耐久性の検討」

本章では、第3章で製作した特殊平板（粉体）の表層部のモルタルがポーラス化していることから強度低下に対する懸念が生じた。コンクリートの物性を調べるため圧縮強度試験、曲げ強度試験、長さ変化試験、簡易凍結融解試験を行った。

## 第6章「結論」

本章では、本研究の成果をまとめ、更に、これら活性アルミナを使用した保水性モルタルを有効利用するためのあり方および今後の検討課題を取り上げた。

## 参考文献

- 1-1) 環境省ホームページ：大気環境・自動車対策，ヒートアイランド現象ガイドライン，1章ヒートアイランド現象とは，2005年
- 1-2) 寺西浩司，吉永美香，永井伴英，諏訪達也：温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発（その1.予備的な模擬日射照射試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，1295，pp 589-590，2008.9
- 1-3) 寺西浩司，吉永美香，永井伴英，諏訪達也：温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発（その2.模擬日射照射試験および屋上曝露試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，1295，pp591-592，2008
- 1-4) Nikkei BPnet：建設IT トップ、連載・コラム、イエイリ建設IT戦略、記事、2011.06.29

## 第2章 保水性コンクリートの実情と温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究

### 2.1 保水性コンクリート研究の現状

ヒートアイランド現象による社会問題は年々大きくなっているが保水性コンクリートは、晴天が数日続くと保水した水が蒸発するなどの不満点から市場に大きく広まっていない。この不満点を解消するため多くの研究が行われている。

筆者らは、保水した水が蒸発しにくい骨材として吸着剤として使われている活性アルミナを選択し活性アルミナを混入したモルタルとコンクリートの2層構造の平板を作成し、温度上昇抑制効果を持つコンクリートの研究を行った。

### 2.2 保水性コンクリートの実情と骨材

#### 2.2.1 保水性舗装の概念と現状の問題点

ヒートアイランド現象による温度上昇は、林立するコンクリート造りの高層ビルや、アスファルト舗装された路面による光反射率の低下、熱吸収率の増加がその大きな要因の一つとされている。

近年では、環境問題に対する意識の高まりから、建物所有者や開発業者は、対策技術の導入に際し、ヒートアイランド対策効果のみならず、企業イメージの向上など様々な意味を込めて対策を実施している。

対策の一つの保水性舗装は、降雨や散水により舗装内に保水された水分が蒸発することで、水の気化熱により路面温度の上昇を抑制する機能を有した舗装である。保水性舗装の概念を図-2.2.1に示す<sup>2-1)</sup>。

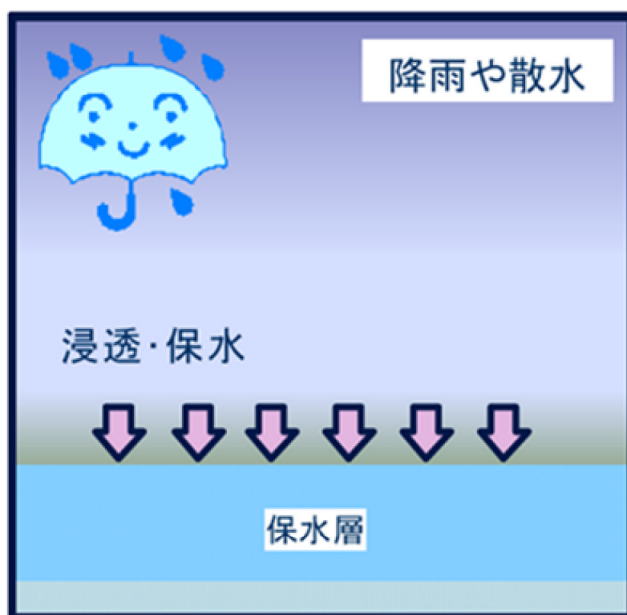
しかしながら、夏季の晴天が続いた時などにその性能を発揮するためには、既存の製品においては保水力に限界があり、舗装内に適宜吸水をする必要性を生じる。この事は道路管理者、建物管理者等に歩行者や一般車両の安全走行への影響までも考慮にいった散水計画を強いり、維持管理の側面から普及を妨げる大きな要因となっている。

路面温度上昇抑制舗装研究会の保水性舗装の実績調査 (図-2.2.2、図-2.2.3)

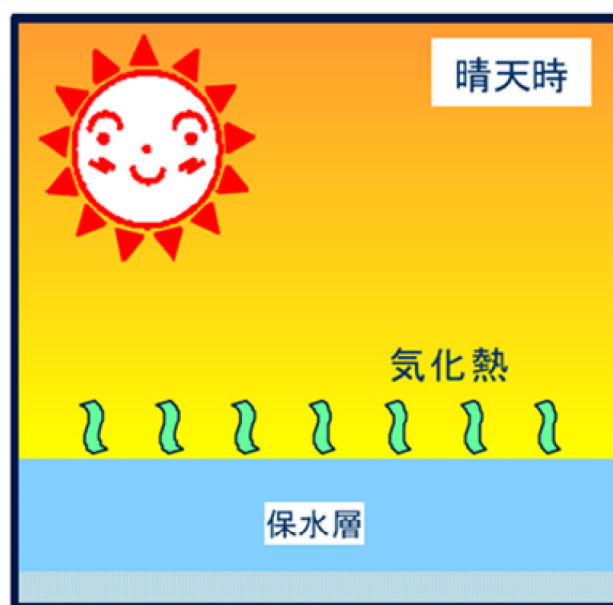


でも、保水性舗装・建材への需要については、全体として減少傾向にある<sup>2-2)</sup>。

そこで、今後開発していく保水性舗装には上記の要因を起こらない保水性舗装を検討していく必要がある。



降雨や散水により舗装内に保水



夏季晴天時は気化熱により路面温度上昇を抑制

図-2.2.1 保水性舗装の概念図<sup>2-1)</sup>

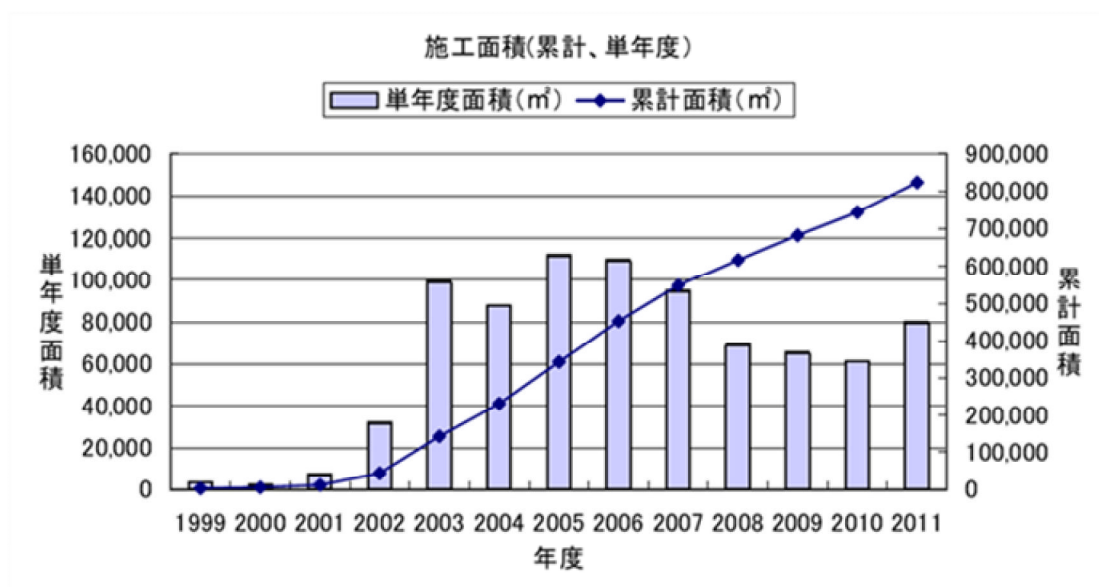


図-2.1.2 保水性舗装施工面積<sup>2-2)</sup>

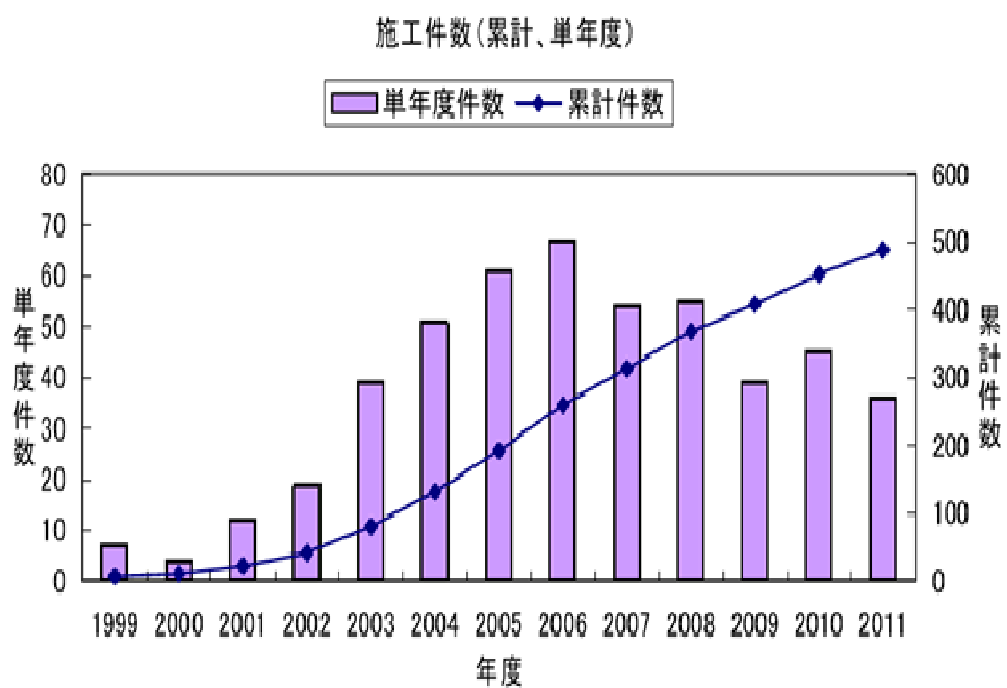


図-2.2.3 保水性舗装施工件数<sup>2-2)</sup>

### 2.2.2 保水性コンクリートの性能向上に使用されている骨材

ヒートアイランド現象対策で使用されているコンクリートには、保水性のコンクリートがある。保水性コンクリートとしては、保水平板やポーラスコンクリートなどが現在よく使われており、ポーラスコンクリート舗装に関する基本的な熱特性の研究<sup>2-3)</sup>や、ポーラスコンクリートに植物を植え付けることにより、コンクリートに緑化を施して温暖化対策を行う技術が提案されている事例もある<sup>2-4)</sup>。また、有機繊維材料と石炭灰を使用したブロックを使った温度上昇抑制効果の研究結果もある<sup>2-5)</sup>。

通常保水性コンクリートに使われている骨材は、ゼオライト系（図-2.2.4）や水砕スラグ（図-2.2.5）など多孔質系形状を持つ骨材が使われている。この骨材は多孔質ではあるが孔の形状が大きく、この骨材を使用したポーラスコンクリートは保水する量が多いが水がすぐに蒸発し長期間性能を維持できない問題がある。この対策として、現在では給水設備などを設置することで解決しているが、初期投資のコスト高の問題や維持管理の問題などから市場に広まっていない。今研究では保水した水分を長期間維持することが目的であることから、使用する保水性骨材は多孔質である孔の大きさが小さく蒸発スピードが遅い活性アルミナを選択した。



図-2.2.4 ゼオライト



図-2.2.5 水砕スラグ

### 2.2.3 活性アルミナ

活性アルミナとは水酸化アルミニウムの $\alpha$ アルミナへの変態過程での大きな比表面積を持つアルミナの総称である。アルミナ水化物の熱変態には7種の変態で、 $\chi$ —アルミナ、 $\gamma$ —アルミナ、 $\eta$ —アルミナ、 $\delta$ —アルミナ、 $\theta$ —アルミナ、 $\kappa$ —アルミナ、 $\alpha$ —アルミナがある。水酸化アルミニウムに加熱を加えて行くと各水化物は終局の変態 $\alpha$ —アルミナへ移行することが分かっている。

水酸化アルミニウムを焼成すると、熱処理温度の上昇とともに $\gamma \rightarrow \delta \rightarrow \theta \rightarrow \alpha$ と変化する、同時に比表面積が低下する。(図-2.2.8) また、アルミナの性状により変化の温度領域が異なることもわかった<sup>2-6)</sup>。今研究で使用した活性アルミナは $\gamma$ アルミナで、比表面積が大きいボール状の形態と粉体状の形態を採用した。

図-2.11に活性アルミナボールの吸水量、吸水後元の重量になるまでの乾燥日数を示す。活性アルミナボールの吸水量が非常に多く、長期間の水分保持が可能であるといえる。活性アルミナボール(図-2.2.6)は住友化学が販売している物を使用した<sup>2-7)</sup>。なお、活性アルミナボールは600円/kg程度とコンクリートの骨材としては非常に高価である。そこで、活性アルミナ粉末(図-2.2.7)は、アルミサッシを製造する工場から排出する副産物の水酸化アルミニウムを焼成することで自作した。

### 2.2.4 粉末の活性アルミナの製造方法

活性アルミナは水酸化アルミニウムを焼成することで制作できる。焼成方法は耐熱皿に薄さ30mm まで水酸化アルミニウムを敷き、卓上マッフル炉で30分間20℃にした後、水酸化アルミニウム内の含水の蒸発と熱伝導率が低い水酸化アルミニウム自体の温度を上昇させるため、6時間かけて徐々に温度を上げた。そして、水酸化アルミニウムから $\gamma$ アルミナに焼成で変位させた。 $\gamma$ アルミナに変位させるために必要な焼成温度は550～650℃で焼成するとされており、当実験でもこの範囲で焼成した。アルミナは断熱効果が高いことから、炉内の雰囲気温度と実際のアルミナの温度との差が大きくなるため、575℃になってから2時間ほど温度をキープして焼成した。実験で使用する活性アルミナを焼成した時

の炉の温度パターンは図-2.2.9に示す。

水酸化アルミニウムが $\gamma$ アルミナに変化しているかどうかは外見上からは判別できないので、水酸化アルミニウムを x 線解析した所、 $\gamma$ アルミナの波形が見られた。図-2.2.10に焼成した水酸化アルミニウムのX線回析の結果を示す。一般的に $\gamma$ アルミナ position  $2\theta$ での位置はJ/JP100の場合45.8、80の場合37.6にピークが出るとされている。図-2.2.10よりピークが確認され、 $\gamma$ アルミナが焼成できていると考えられる。これ以上の温度で焼成すると $\alpha$ アルミナに変位する。 $\alpha$ アルミナに変異すると水を吸着する性質を失ってしまうため焼成温度は800℃を超えないように調整した。



図-2.2.6 活性アルミナボール



図-2.2.7 活性アルミナ粉体

化学名 酸化アルミニウム

化学式  $\text{Al}_2\text{O}_3$

CAS No. 1344-28-1

化審法 (1)-23

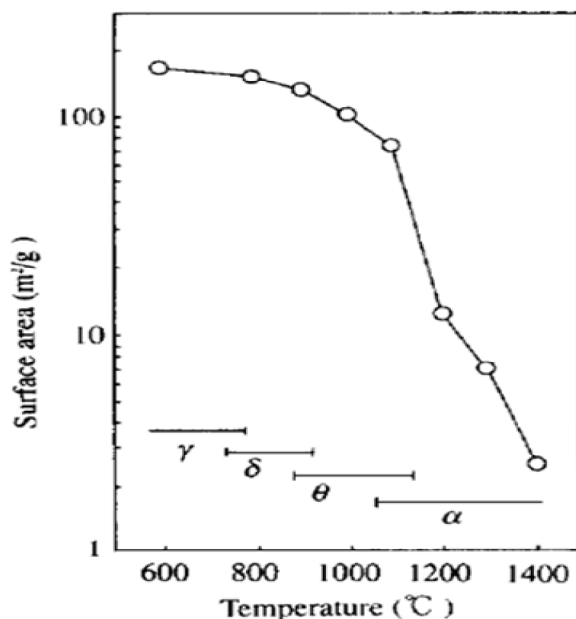


図-2.2.8 焼成温度によるアルミナの変態の過程と比表面積の変化<sup>2-6)</sup>

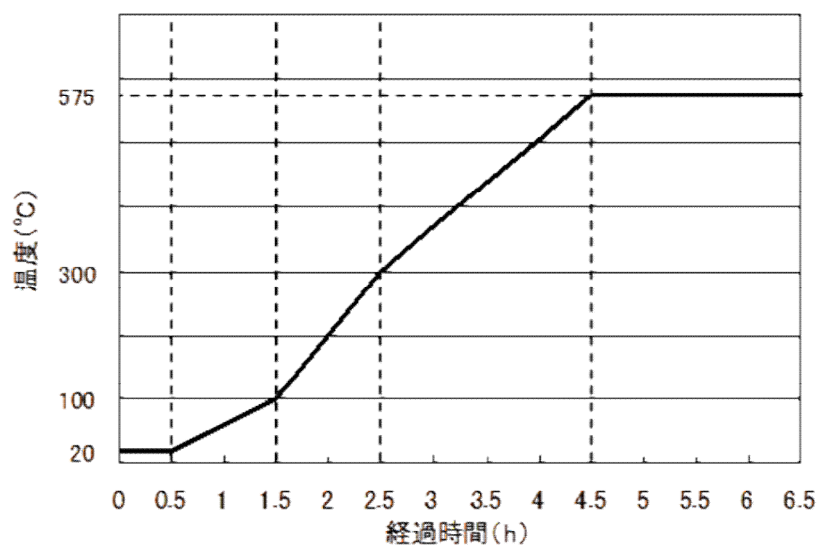


図-2.2.9 炉内焼成温度パターン

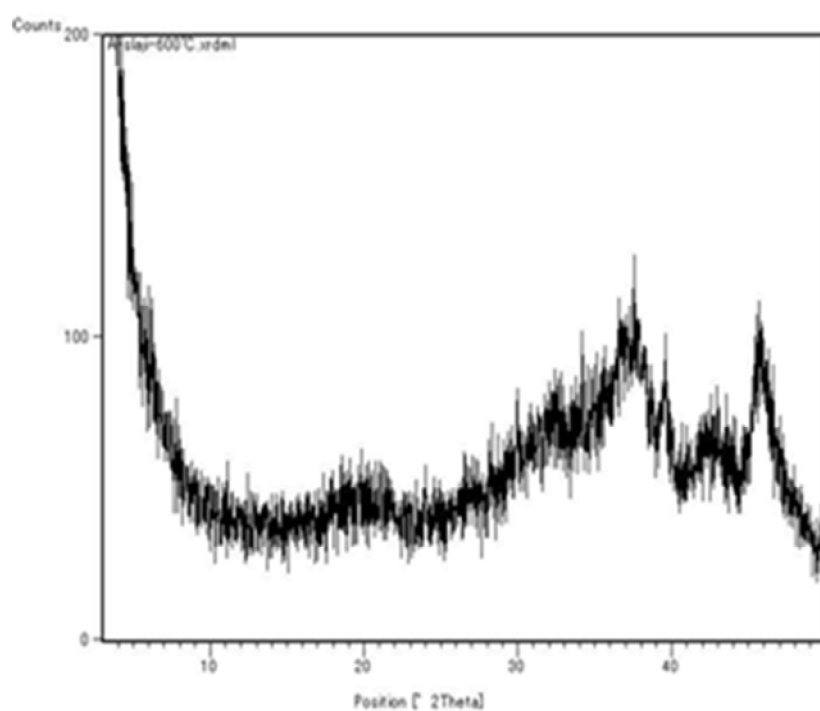


図-2.2.10 活性アルミナの x 線解析図

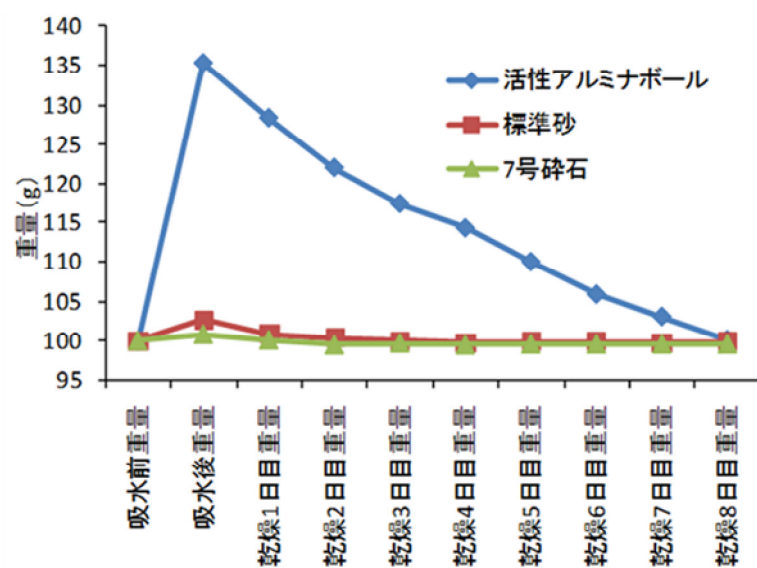


図-2.2.11 活性アルミナボールの吸水量の経時変化

## 2.3 温度上昇抑制効果を持つコンクリートの既往の研究

### 2.3.1 ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果

永井ら<sup>2-9)</sup>は、ヒートアイランド現象抑制を目的とした屋上スラブ面に敷設することを想定したポーラスコンクリートブロックに対し、模擬日射の照射試験を行い、その温度上昇抑制効果を検討した。

12時間後の表面温度を図-2.3.1に示す。その結果、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果があることが確認された。しかし、ポーラスコンクリート側面及び底面にウレタン樹脂により防水処理を施した上でも、ポーラスコンクリートの温度上昇抑制効果は普通コンクリートと比べて、空隙率で多少違うが1～6℃前後であった。その点、土壌は普通コンクリートとの表面温度の差が30℃近くあった。またポーラスコンクリートの厚さで多少の前後はあるが、1～3時間での温度上昇が安定している。これは、ポーラスコンクリート表面の空隙水が急激に蒸発したためであると考えられる。その後、深部の空隙水はほぼ蒸発せず、普通コンクリートと同様に温度が急上昇し、最終的な温度上昇抑制効果はさほど見られない結果であると報告されている。

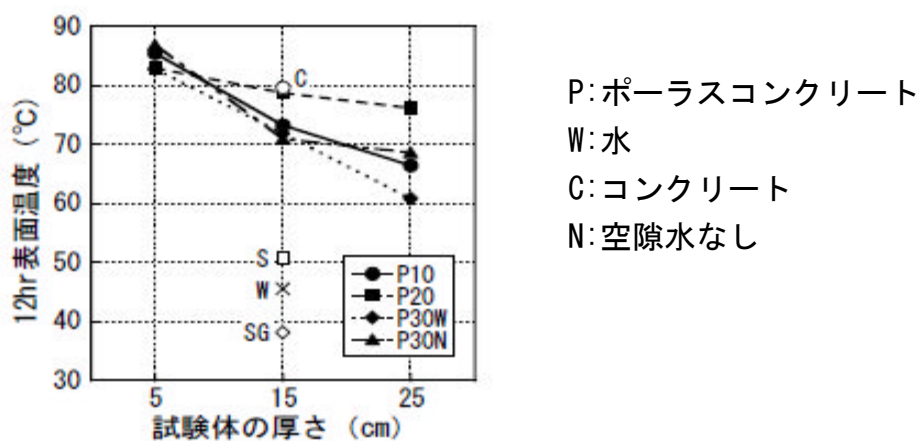


図-2.3.1 12hr 表面温度



### 2.3.2 温度上昇抑制効果を有するポーラスコンクリートブロックの開発 (その1. 予備的な模擬日射照射試験)

永井らの研究結果を受けて、寺西ら<sup>1-2)1-3)</sup>は、保水性建材としてのポーラスコンクリートの機能をより高める方法について、ポーラスコンクリート空隙中に吸水性樹脂を注入し、模擬的な日射の照射試験を行った。

水分蒸発量の経時変化を図-2.3.2に表面温度の履歴を図-2.3.3に示す。その結果、ポーラスコンクリートブロックの空隙中に吸水性樹脂を混入したセメントペーストを注入すると、注入しない場合と比べて、水分蒸発量が減少し、温度上昇抑制効果が低くなった。ただし、ブロック深部の水分の保持効果は高くなり、温度上昇抑制効果を持続期間が長くなることが報告されている。

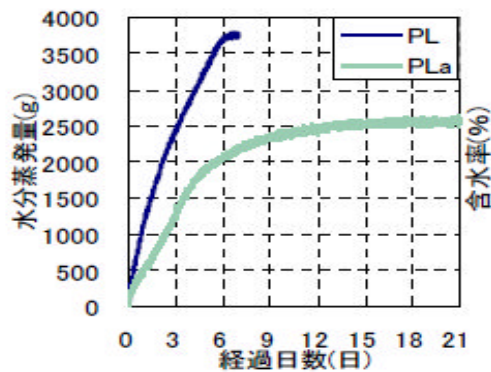


図-2.3.2 水分蒸発量の経時変化

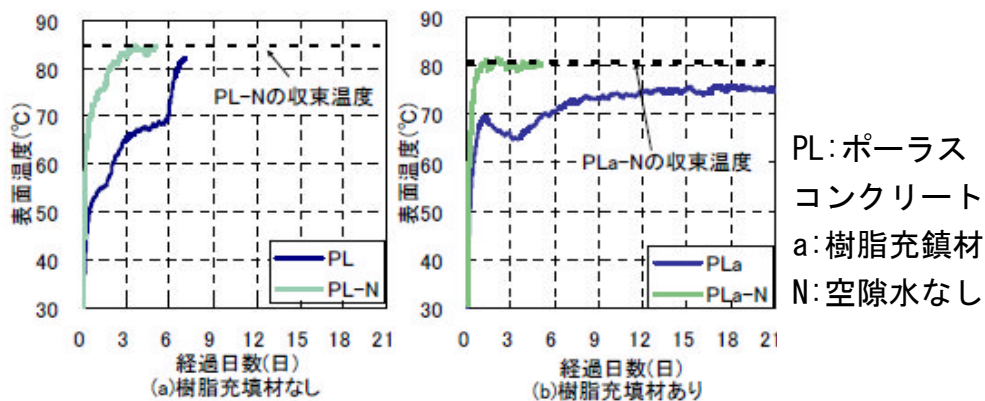


図-2.3.3 表面温度の履歴

### 2.3.3 ヒートアイランド現象を抑制する多孔質保水瓦の基礎的特性

横田耕三ら<sup>2-10)</sup>はヒートアイランド現象を抑制する保水煉瓦設計における基礎的物性の構築を目的に、モデル的な多孔体を作製し多孔体の気孔径及び気孔率が、揚水性、透水性及び表面温度低減に及ぼす影響を定量的に評価した。それぞれの関係を図-2.3.4、図-2.3.5に示す。

その結果、多孔体の表面温度低下量は水分蒸発速度により決定されることを明らかにした。図-2.3.6に示す。よって保水材料は、低い含水率まで蒸発速度が低下することなく、自身のもつ水分を有効に気化熱に変換できる限界含水率の低い材料が温度低減効果に優れると報告している。単一気孔径分布を有する保水煉瓦においては、透水係数を維持するために気孔率33%以上、蒸発速度を保つために気孔径4 $\mu\text{m}$ 以上、一般的な舗道用煉瓦の厚みである60mmの揚水高さを確保するために気孔径30 $\mu\text{m}$ 以下に制御することで、保水煉瓦の水の出入りに関する総合的な能力が高く、ヒートアイランド現象抑制に寄与できる建材になり得るものと推察している。

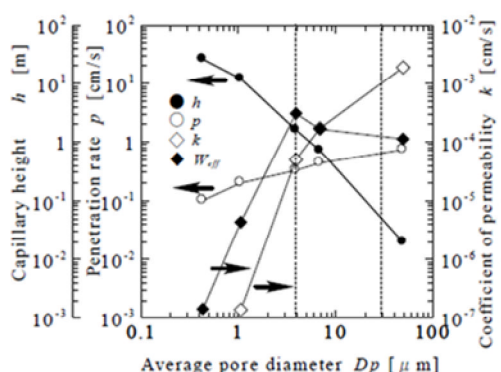


図-2.3.4 気孔径と揚水高さ，揚水速度，透水係数および有効含水率の関係

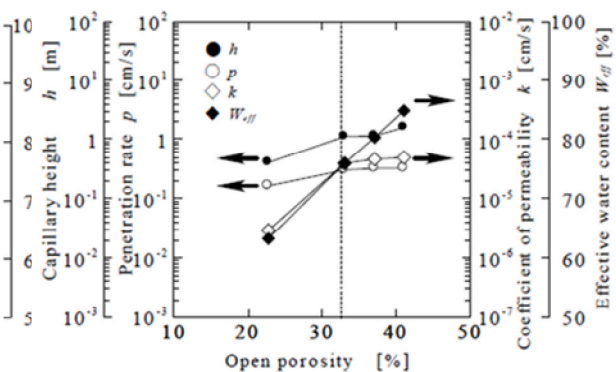


図-2.3.5 気孔率と揚水高さ，揚水速度，透水係数および有効含水率の関係

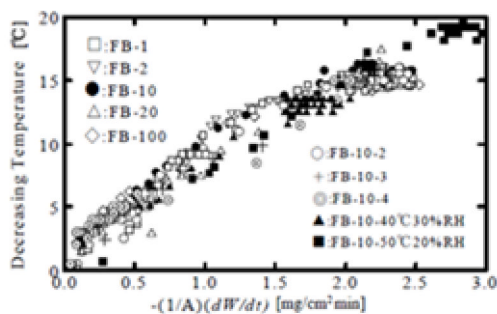


図-2.3.6 多孔体表面からの水分蒸発速度と表面温度低下量

#### 2.3.4 温度上昇抑制効果能力をコンクリートに付与するモルタルの開発

2.3.2の結果を受け、更なる温度上昇抑制効果を目指し、高橋ら<sup>2-11)</sup>は直径4mmの保水能力が高い活性アルミナボールを骨材として選択した。

測定に使用した活性アルミナボール混入モルタルを使った平板は2層構造の作りになっており制作に手間がかかる。そこで、活性アルミナボールを使った平板の製造過程を下記に示す。

活性アルミナボールを使用した平板（以後、特殊平板（ボール）と記す）の作製は、初めにモルタルを流し込む型枠の底部に硬化遅延剤を塗っておく。次に表-2.2にある表層の材料と水をJIS R 5201:1997に準じる方法で混練したセメントモルタルを製造する。表層に使用する骨材のうち、活性アルミナボールは水の吸水量が大きいので、前もって表乾状態にしておいた。作製したセメントモルタルを型枠の表層の位置まで流し込み突き棒で締め固めた後、振動機でエアを抜く。次に表-2.2にある基層の材料を示す骨材を空練し、水を加えてモルタルを製造する。製造したモルタルを残りの高さに流し込み突き棒で締め固めた。一日養生後、型枠を取り外し硬化遅延剤を塗った部分を洗い出しすることで、活性アルミナボールを露出させた後（図-2.3.8）、養生を行う。図-2.3.7に特殊平板（ボール）の作製手順を図示する。

練混ぜ方法は JIS R 5201:1997<sup>2-8)</sup>に準じる。

- 1) 規定量の水、セメント、活性アルミナボールを順に投入する。
- 2) 低速 30 秒後規定量の石灰細砂を 30 秒間で投入する。
- 3) 高速回転 30 秒後 90 秒休止、最初の 15 秒でさじを用いモルタルをかき落とす。
- 4) 高速回転 60 秒後さじで 10 回かき混ぜる。

上記の手順で行い、モルタルを作製した。

太陽光線の照射によるモルタルの温度上昇を調べるため屋外曝露試験を行った。屋外曝露試験は野外において日光を受光する場所に実験装置（図-2.3.9）を設置し、24時間の温度測定を行った（図-2.3.10）。また、活性アルミナボールが白色であることから色による温度差の影響を考え白色ポルトランドセメン

トを使用した平板との比較を行い気化熱による温度抑制効果がどの程度出たのかを確認した（図-2.3.11、図-2.3.12）。

屋外曝露試験から、保水性の高い骨材を使用することで気化熱による温度上昇抑制効果を確認できた。次に、モルタルに含水した水分の蒸発量とモルタルの温度の関係を調べるためハロゲンライト照射試験を行った。装置は図-2.4.13に示す構造とする。

ハロゲンライト照射試験では、試験体を室内でハロゲンライトを照射して温度測定及び試験体の含水水分重量の変化の測定を行った。（図-2.3.14～図-2.3.16）また試験装置の周りには湿度と温度と風の影響を少なくするために発泡ポリスリレンフォームで壁および天井を作製し密閉した。

表-2.1 各モルタルの使用材料

材料		種類
セメント		普通ポルトランドセメント （密度：3.15g/cm <sup>3</sup> ） 白色ポルトランドセメント （密度：3.06g/cm <sup>3</sup> ） 高炉セメント （密度：3.04g/cm <sup>3</sup> ）
骨材	7号碎石	粒径 2.5～5 mm, 表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup>
	細砂	粒径 1.2～0.6 mm, 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup>
	石灰砕砂	粒径 2.5～0.6 mm, 表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
	活性 アルミナ	粒径 4 mm, 表乾密度 0.82g/cm <sup>3</sup> 細孔容積 0.43 g/ml 比表面積 140m <sup>2</sup> /g

表-2.2 特殊平板（ボール）表層の配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	空気 量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	ポルト ランドセ メント	白色 セメン ト	活性ア ルミナ ボール	細骨材	AE 減水 剤
表層	40	15	4	133	0	333	420	539	0
基層	40	0	4	99	248	0	0	2054	0

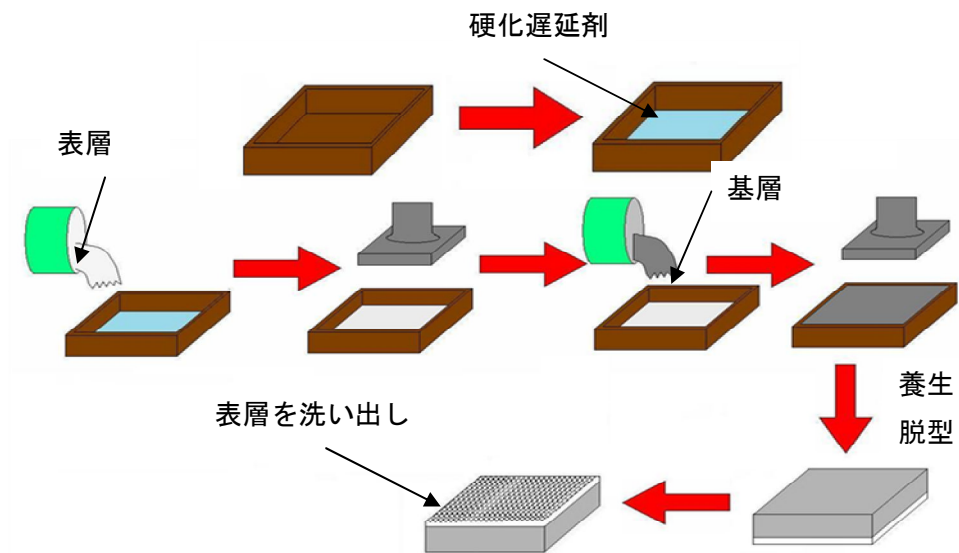


図-2.3.7 特殊平板（ボール）の作製手順



図-2.3.8 洗い出した特殊平板（ボール）の表情

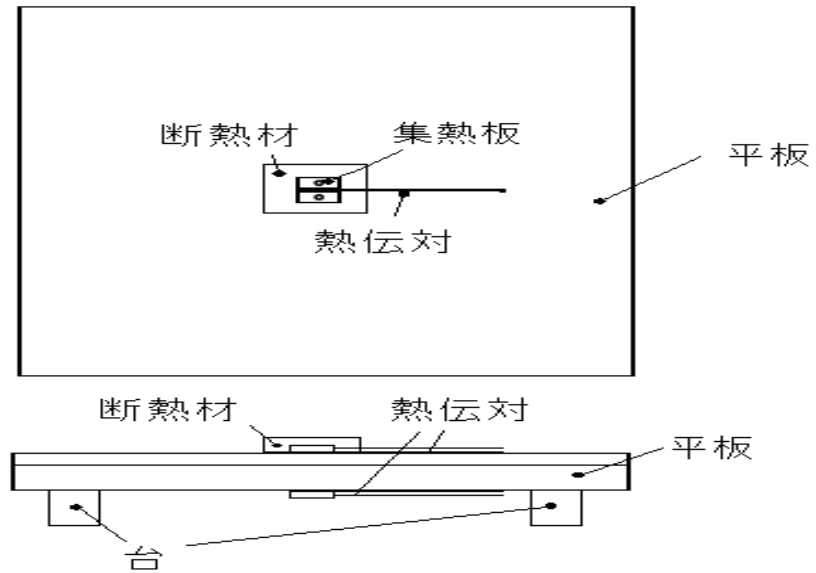


図-2.3.9 屋外曝露試験装置

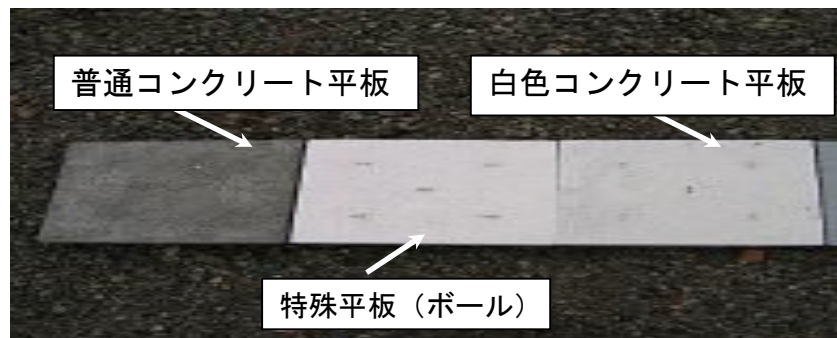


図-2.3.10 屋外曝露試験の測定

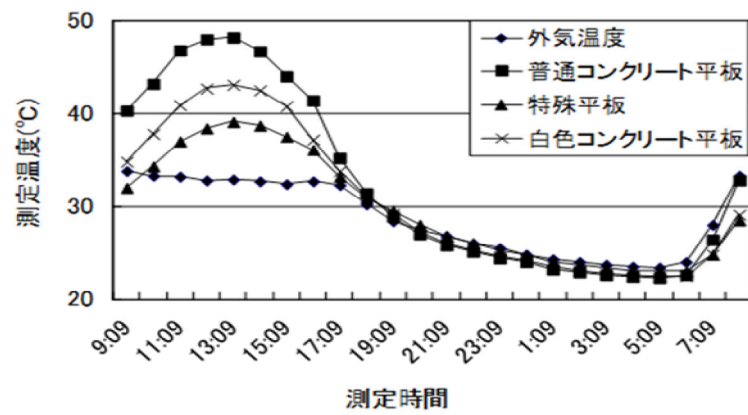


図-2. 3. 11 同色による温度比較

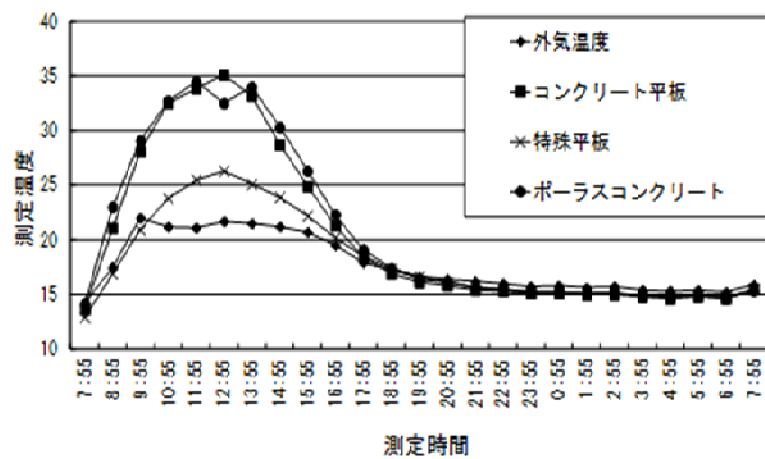


図-2. 3. 12 各平板の温度変化の比較

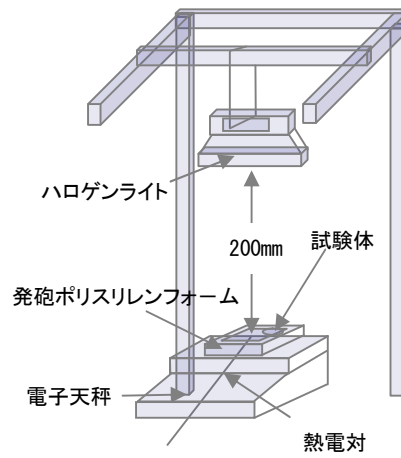


図-2.3.13 ハロゲンライト照射試験装置

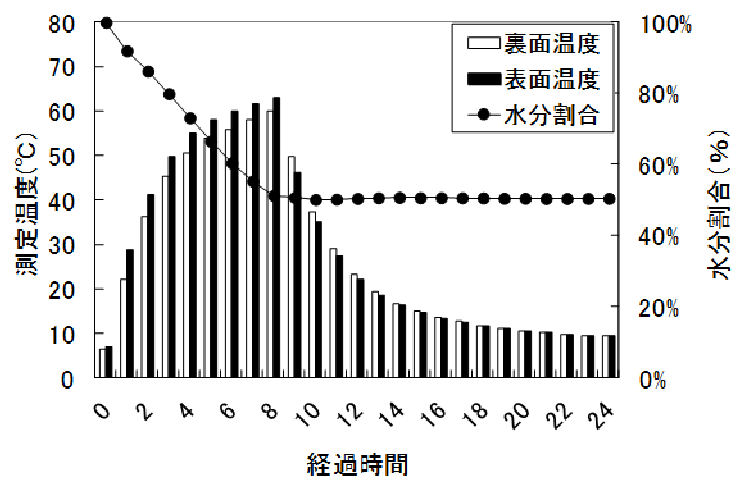


図-2.3.14 コンクリート平板の水分量と温度の関係

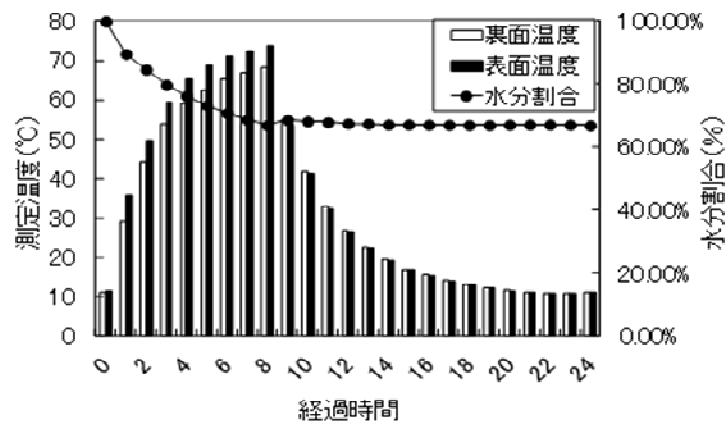


図-2.3.15 ポーラスコンクリート平板の水分量と温度の関係



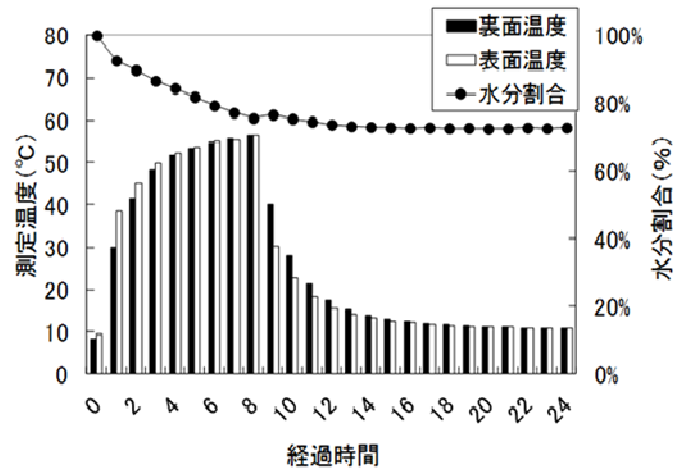


図-2.3.16 特殊平板（ボール）の水分量と温度の関係

温度上昇抑制効果の増大を確認するため屋外曝露試験、模擬的な日射照射試験を検討した。以下に得られた結果を示す。

- 1) 屋外曝露試験より、特殊平板（ボール）の最大温度が一番低く、長時間の温度上昇を抑制する。
- 2) 模擬日射照射試験より、長期間の温度上昇を抑制するには次の3つの条件が重要であることがわかった。
  - i. モルタル内部に吸水される水の吸水量が多いこと。
  - ii. 吸水した水をモルタル内部に蓄積し続けること。
  - iii. 内部に吸水した水を効率よく蒸発できること。

## 2.4 既往の研究と本研究の関係

既往の研究において、活性アルミナボールを混入したモルタルを使用することで温度上昇抑制が可能となったが、活性アルミナボールを骨材として使用したモルタルは製造方法が困難であること、活性アルミナボール自身が高価であることから大量生産するのが難しいことが明らかになった。

本研究では先の研究で挙げた問題点を解決するため使用する骨材を活性アルミナボールから活性アルミナ粉末に変更することで活性アルミナボールと同じ性能を維持できるかを比較測定することで確認を行う。また、推察された温

度上昇抑制メカニズムを裏付けるような、モルタルの耐久性の検査、モルタル内部の空隙の詳細確認、モルタルの温度上昇抑制効果を実際の建屋を使用することで建屋自身と建屋内部がどのような効果があるのかを確認することを目的とし、温度上昇抑制メカニズムの再検討および長期的な実用を行うため以下の試験を実施した。

### **活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認**

- 1) ハロゲンライト照射試験
- 2) ハロゲンライト照射試験の妥当性の検討

### **温度上昇抑制効果を持つモルタルの実証試験と保水のメカニズムの確認**

- 1) モルタルを使用した建屋に与える影響の確認
- 2) 走査型電子顕微鏡および光学顕微鏡を用いた空隙の目視観察
- 3) 細孔径分布の計測による内部空隙の量および直径の確認
- 4) 保水性、吸水性、吸上げ高さ試験

### **モルタルの耐久性試験**

- 1) モルタルの圧縮強度試験、曲げ強度試験
- 2) 長さ変化試験
- 3) 簡易凍結融解試験

## 参考文献

- 2-1) 路面温度上昇抑制舗装委員会ホームページ：路面舗装の技術資料と実績，  
保水性舗装技術資料
- 2-2) 路面温度上昇抑制舗装委員会ホームページ：路面舗装の技術資料と実績，  
保水性舗装の実績
- 2-3) 三島直生ほか：屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.2，pp337-342，2008
- 2-4) 河上晃一郎ほか：産業副産物を活用したポーラスコンクリートの緑化基盤材への応用，日本建築学会大会学術講演梗概集，1422，pp859-860，2007
- 2-5) 住 学 ほか：保水性コンクリートに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1424，pp 863-864，2007.8
- 2-6) 小澤正邦ほか：高耐熱性三元触媒，豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 27 No. 3 ( 1992. 9 )
- 2-7) 住友化学ホームページ：事業・製品，基礎科学部門，主な製品
- 2-8) JIS Translated and published by Japanese standards Association JIS R5201:1997  
Physical testing methods for cement
- 2-9) 永井伴英ほか：ポーラスコンクリートブロックの温度上昇抑制効果，コンクリート工学年次論文集， Vol.30，No2，pp.361-366，2008
- 2-10) 横田耕三ほか：ヒートアイランド現象を抑制する多孔質保水瓦の基礎的特性，日本ヒートアイランド学会論文集， Vol.5，pp. 40-46，2010
- 2-11) 高橋篤史，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：温度上昇抑制効果能力をコンクリートに付与するモルタルの開発，コンクリート工学年次論文集， Vol.32，No1，pp.1829-1834，2010

### 第3章 活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認

#### 3.1 はじめに

高橋らの行った研究から、特殊平板（ボール）は、ポーラスコンクリートと比べ温度上昇抑制効果があることが確認できたが、活性アルミナボールが非常に高価であることや活性アルミナボールを平板の表面に出すための製造工程が複雑で困難であることから、活性アルミナボールではなく、活性アルミナ粉末を使用した平板（以後、特殊平板（粉体）と記す）を作製して普通コンクリート平板、特殊平板（ボール）との比較測定を行った。

#### 3.2 特殊平板（粉体）の製作

平板供試体の寸法は100×200×60mmで特殊モルタル平板供試体の表層部の厚みは5mm、基層部の厚みは55mmとした。特殊平板（粉体）の使用材料は表-2.1、配合は表-3.1に示す。表-3.1にある表層の材料と水を2.3.4にあるJIS R 5201:1997に準じる方法で混練したセメントモルタルを製造した。作製したセメントモルタルを型枠の高さ5mmの位置まで流し込み突き棒で締め固めた後、振動機でエアを抜いた。次に表-3.1にある基層の材料を普通コンクリート平板作成と同じ方法で混練しモルタルを製造した。モルタルを残りの高さまで流し込み突き棒で締め固めた。

表-3.1 特殊平板（粉体）の配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	ポルトランド セメント	白色 セメント	活性アル ミナ粉末	細骨 材	AE 減水 剤
表層	85	15	4	238	0	280	110	1313	0
基層	40	0	4	99	248	0	0	2054	0

### 3.3 ハロゲンライト照射試験

ハロゲンライト照射試験装置を用いて、ハロゲンライトが平板供試体に与える熱量、平板供試体の温度と平板供試体に含水した水分の蒸発量を測定した。測定は2.3.4で行った方法と同様で図-2.3.13に測定方法の図を示す。平板供試体は特殊平板（ボール）と特殊平板（粉体）、普通コンクリート平板供試体の3種類である。特殊平板（ボール）は2層構造とし表層は活性アルミナボール入れたモルタル、基層は普通モルタルである。普通コンクリート平板供試体は普通モルタルを使用した1層構造である。普通コンクリート平板という名称は測定前試験で、コンクリートとモルタルとでは、同様の結果となったため2つをまとめて普通コンクリート平板とした。特殊平板（粉体）以外の平板供試体は2.3.4と同様のものを使用した。各平板供試体の寸法は100×200×60mmで特殊モルタル平板供試体の表層部の厚みは5mm、基層部の厚みは55mmとした。ハロゲンライトは500wを使用した。

#### 3.3.1 測定準備と測定方法

測定する平板供試体を $105\pm5^{\circ}\text{C}$ で定質量となるまで乾燥し室温まで冷やし、絶乾重量を測定した。なお平板供試体に乾燥収縮ひび割れは発生しなかった。その後に室温の水中に24時間平板供試体を浸した後、平板供試体を表乾状態にして表乾重量を測定する。表乾重量から絶乾重量を引いた値をその平板供試体に含水している水分量とする。平板供試体の上に熱電対を取り付け、試験片の上面以外からの水分および熱の移動を防ぐため側面および底面に防水シート、発泡スチロールの順番で覆い、上面には熱電対がハロゲンライトの赤外線照射の影響を受けないよう熱電対の上に断熱材を付けた。ハロゲンライトから試験片の距離を200mmとし、温度変化と含水水分量変化の同時測定開始する。開始から8時間はハロゲンライトで照射し、その後の16時間はハロゲンライト照射を停止する。これは屋外の日照条件を想定し日中を8時間、夜間を16時間と設定した。測定開始から1時間おきにデータロガーで温度測定、電子天秤で水分量を24時間測定した。

### 3.3.2 照射試験の妥当性の検討

ハロゲンライト照射試験の模擬日射としての性能評価を検討するにあたって、試験方法の妥当性を検討する必要がある。寺西<sup>1-2, 1-3)</sup>らは、特に、ハロゲンライト照射試験方法の物理的意味に関しては検討されていない。今回の照射試験が、実際の太陽光の照射を模擬しているかどうかを検討するにあたり、熱力学の観点から検討した。

一般に、太陽光から受ける地球の熱エネルギーは数%にも満たない。よって、ハロゲンライトから平板供試体に受ける熱エネルギーも同程度である必要がある。換言すれば、屋外暴露試験で平板供試体が熱エネルギーを受け気化熱を発生したように、ハロゲンライトから適度な熱量を平板供試体に伝えていることを確認する必要がある。

本試験装置において平板供試体がハロゲンライトから受ける熱量を求め、平板供試体の気化熱と平板供試体自体が有する熱量の総和が、活性アルミナ粉末混入の有無に関係なく平板供試体で同程度であることを確認することとした。

本研究では、ハロゲンライトが平板供試体に与える熱量は水の温度と蒸発量で求められると仮定した。測定は、3.3.1項に示した方法で平板供試体の代わりに黒い容器に水100gを入れ1時間ハロゲンライトを照射した後に蒸発した水の重量を測った。黒い容器は光を吸収するため熱量を正確に測定することができる。水1gが1℃上昇する熱量1calであり、水1g蒸発した時に発生する熱量580calである。よってハロゲンライトが平板供試体の位置に与える熱量A(kcal/h)は式(1)で求めた。

$$A = ((C-B) \times 1\text{cal} \times 100 + D \times 580) / 1000 \quad (1)$$

Bは測定前の水の温度、Cは測定後の水の温度、Dは1hで蒸発した水の量である。上記の測定を行うと水量11g蒸発、温度は21℃/h上昇した。式(1)より、ハロゲンライト照射が平板供試体に与える熱量Aは8.48kcal/hとなった。

### 3.4 ハロゲンライト照射試験結果

図-3.1～図-3.3にハロゲンライト照射試験の結果を示す。水分割合とは、平板供試体が含んでいる水の量の割合を示す。図の折線から平板供試体が蓄えて

いる水分の蒸発速度が判る。曲線がなだらかなほど、水分の蒸発期間が長くなり長期間の気化による温度抑制効果が期待できる。水分割合  $W$  (%) を式 (2) に示す。ここで平板供試体の表乾質量を  $\alpha$ 、絶乾質量を  $\beta$ 、平板供試体のハロゲンライト照射試験中に蒸発した水分の変化量を  $\gamma$  とする。

$$W = \gamma / (\alpha - \beta) \times 100 \quad (2)$$

最大温度は普通コンクリート平板が 84.6℃で特殊平板（ボール）が 82.5℃、特殊平板（粉体）が 78.1℃になった。測定終了時の平板供試体の水分割合は、普通コンクリート平板は 57.09%で特殊平板（粉体）は 62.58%、特殊平板（ボール）は 46.29%の水が残った。また、特殊平板（粉体）は、特殊平板（ボール）よりも温度が低くなることが分かった。

ハロゲンライト照射が平板供試体に与える熱量  $A$  は 3.3.2 項の実験から 8.48kcal/h である。ハロゲンライトは 500W で  $1W=860\text{cal/h}^{3-1}$  より、1h に  $500 \times 860=430\text{kcal/h}$  となり、平板供試体の位置には、2%程度の熱量しか伝わっていない。この平板供試体に与える熱量  $A=8.48\text{kcal/h}$  が、平板供試体が 1h で受熱した熱量  $E$  (kcal/h) と 1h で発生した気化熱量  $F$  (kcal/h) を加えた熱量  $G$  (kcal/h) に相当すると仮定し、両者の平板供試体の受熱量を求めた。熱量  $G$  は式(3)で計算した。計算条件は平板供試体の熱容量  $H$  (kcal/℃)、平板供試体の温度変化  $I$  (℃/h)、平板供試体の蒸発した水分重量  $J$  (g/h) とした。 $H=0.58\text{kcal/℃}$  で 2 つの平板供試体で同じとした。

$$G = E (=H \times I) + F (=J \times 0.58) \quad (3)$$

測定の開始から 6 時間までの熱量  $G$  を求めた結果を図-3.4 に示す。測定開始から 1 時間は、ハロゲンライト照射が平板供試体に与える熱量  $A$  の 8.48kcal/h に比べ 2 倍以上の値である。これは、ハロゲンライトによって暖められた測定装置内の空気の温度が平板供試体の温度より大きく、この装置内の空気の温度が平板供試体の熱量に伝わったためと考えられる。逆に測定から 8 時間後のデータになると平板供試体の温度が空気中の温度より高くなり平板供試体の熱量が空気中に放出されるため、 $A$  の 8.48kcal/h より小さくなる。測定装置内の温

度が安定した測定開始から2～3時間の熱量Gがハロゲンライト照射が平板供試体に与える熱量とほぼ一致している。これより、本試験方法による気化熱の温度上昇抑制効果の定量化は妥当であると言える。

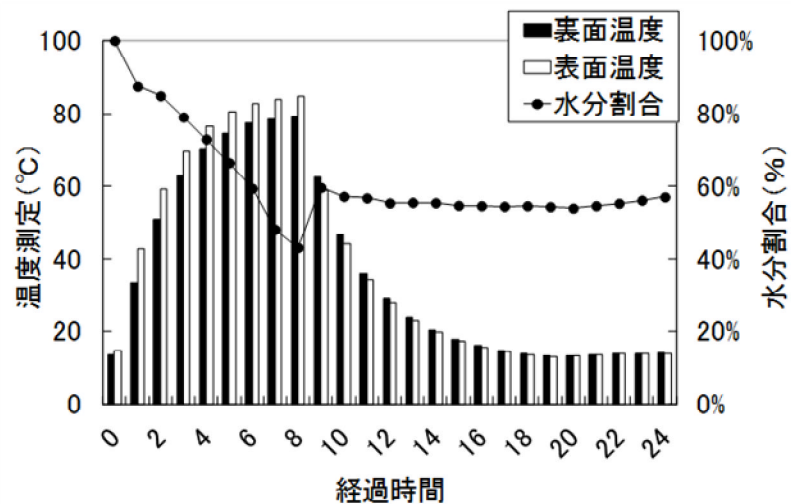


図-3.1 コンクリート平板の水分量と温度の関係

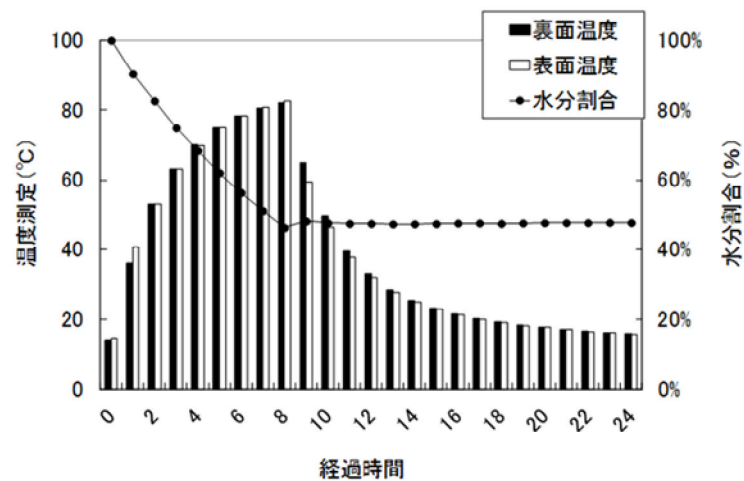


図-3.2 特殊平板（ボール）の水分量と温度の関係



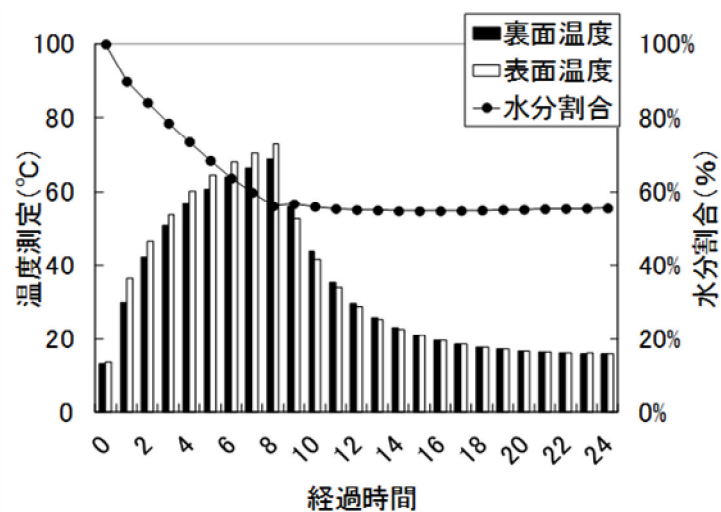


図-3.3 特殊平板（粉体）の水分量と温度の関係

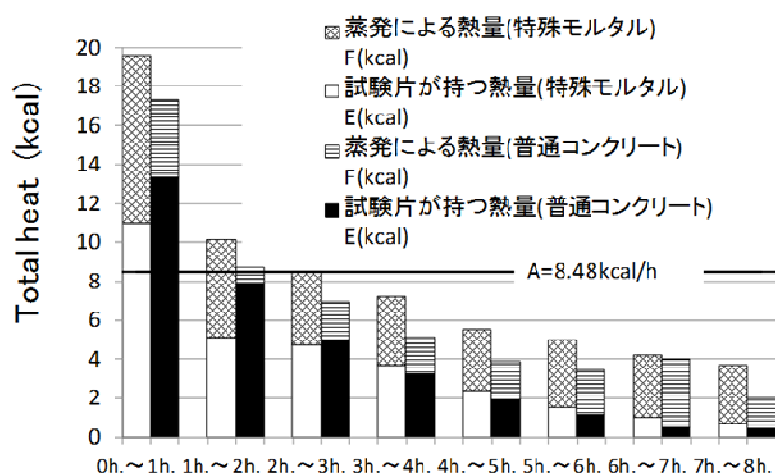


図-3.4 各時間による平板供試体の得た熱量

### 3.5 結論

本章で得られた結果を以下に示す。

- (1) 活性アルミナボールより活性アルミナ粉末を使用したモルタルの方が温度上昇抑制効果が高い。
- (2) ハロゲンライト照射試験から平板供試体は気化熱による温度上昇抑制効果が働いていることが確認できた。
- (3) 照射試験の妥当性の検討から500wのハロゲンライトの熱エネルギーは平板に届くまでにほとんどのエネルギーが外部に拡散している。

活性アルミナ粉末を混入するとモルタルの高 W/C 化が起き内部構造のポーラス化が発生したと思われる状況を測定中に確認した。そこで内部に存在する空隙が、保水量増加および細孔空隙であるため水分の長期間保持を可能としたと推察を行った。しかし、推察は行ったが内部空隙の量や大きさは明らかとなっていない。また、ポーラス化により通常のモルタルより強度が無く JASS 7 M 101 インターロッキングブロックの品質規格を満たしているかを確かめる必要がある。

### 参考文献

- 3-1) 東芝ライテック（株）ホームページ：設計・提案支援、照明設計資料、照明設計の基礎、照明の熱計算

## 4章 温度上昇抑制効果を持つモルタルの実証試験と保水のメカニズムの確認

### 4.1 はじめに

筆者らが行った、屋外曝露試験とハロゲンライト照射試験の温度測定結果から、温度上昇抑制効果が確認された。そこで、活性アルミナ粉末を混入したモルタルを建家に使用した時、建家にどのような影響を与えるかを調べるために、活性アルミナ粉末混入モルタルを用いた建屋と普通のコンクリートを用いた建屋の比較実証試験による建屋の温度上昇抑制効果の検証を行った。また、既往の研究からモルタルのポーラス化が起きていることが推測されているが、空隙の確認が行われていないので、温度上昇抑制メカニズムの根拠となる空隙の確認を行った。

### 4.2 実験概要

#### 4.2.1 実験の構成及び使用材料

本実験は、実証試験、細孔径分布の計測、光学顕微鏡、見掛気孔率の測定、保水性試験、吸水性試験、吸上げ高さ試験の実験を行った。用いた使用材料をまとめて表-2.1 に示す。活性アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) は水酸化アルミナを焼成して作成した。すべての実験で作製したモルタルの練混ぜ方法は、「セメント物理試験方法 (JIS R 5201:1997)」に準じた。

#### 4.2.2 実証試験

活性アルミナ粉末を混入したモルタルを表層、普通コンクリートから成る基層の 2 層構造であるコンクリートの屋根、活性アルミナ粉末を含む表層とコンクリート系のサイジングボードを基層の壁の建屋と上記の建屋（以下、建屋）から活性アルミナを含む表層を除いた通常の建屋（以下、比較用建屋）の 2 種類を夏季と冬季に 24 時間同時測定を行った。次に、活性アルミナ粉末をセメントに混入すると活性アルミナ粉末が白色からモルタル自身が活性アルミナ粉末を入れていないものと比べると若干白くなる。そこで、活性アルミナ粉末を使

用した白色セメントモルタルの建屋と使用していない白色セメントモルタルの建屋を用いて行った。互いに表層部に白色セメントを使用したことで色による温度差が影響をなくし、気化熱による温度変化だけを判断できるようにした。建屋は、愛媛県西条市の野外において一日中日光を照射する場所に設置し温度測定を行った。



建屋屋根



建屋



比較用建屋

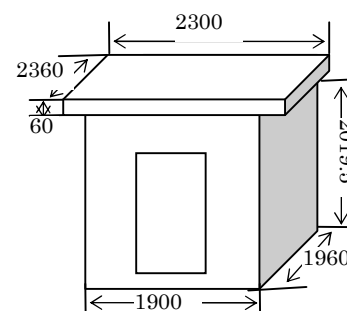
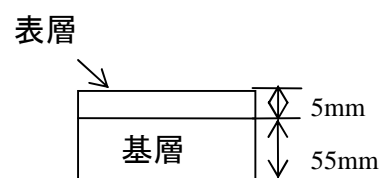


図-4.1 建屋写真と寸法

### 4.2.3 試験建屋

建屋屋根と白色モルタルを塗った比較用建屋は基層と表層からなる 2 層構造  
比較用建屋は 1 層構造とした。図-4.1 に試験に用いた建屋の外観および形状・  
寸法を示す。基層は厚さ 55mm、表層は厚さ 5mm である。

使用材料は表-4.1、配合は表-4.2 と表-4.3、表-4.4 に示す。2 層構造の配合  
で基層は比較用建屋と同じなので省略した。活性アルミナ粉末の混入率は水を  
除くすべての構成材料の質量の総重量に対する活性アルミナ粉末の質量比を意  
味する。

### 4.2.4 測定期間と測定方法

実証試験の期間は、平成 24 年 9 月 3 日の 6 時 00 分から 17 日の 7 時 00 分ま  
でとした。測定には、データロガーと熱電対を使い、建屋の屋根、外気温およ  
び建屋内部の温度計測を 1 時間毎に行った。また、接触型の簡易デジタルモル  
タル水分計を用いて、計測開始時と 24 時間後の屋根の含水率を計測した。

表-4.1 各モルタルの使用材料

材料		種類
セメント		普通ポルトランドセメント (密度:3.15g/cm <sup>3</sup> ) 白色ポルトランドセメント (密度:3.06g/cm <sup>3</sup> ) 高炉セメント (密度:3.04g/cm <sup>3</sup> )
骨材	7号碎石	粒径 2.5~5 mm, 表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup>
	6合碎石	粒径 5~13mm, 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup>
	細砂	粒径 1.2~0.6 mm, 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup>
	石灰砕砂	粒径 2.5~0.6 mm, 表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
	活性 アルミナ	粒径 4 mm, 表乾密度 0.82g/cm <sup>3</sup> 細孔容積 0.43 g/ml 比表面積 140m <sup>2</sup> /g

表-4.2 建屋屋根表層の配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	ポルトランド セメント	白色 セメント	活性 アルミナ	細骨材	AE 減 水剤
表層	100	15	4	365	0	365	183	669	C×1%

表-4.3 比較用建屋屋根の配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	ポルトランド セメント	白色 セメント	活性 アルミナ	粗骨材	AE 減 水剤
基層	40	0	4	99	248	0	0	2054	0

表-4.4 白色モルタルを塗った比較用建屋屋根表層の配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水	ポルトランド セメント	白色 セメント	活性 アルミナ	細骨材	AE 減 水剤
表層	40	0	4	99	0	248	0	2054	0

表-4.5 内部空隙の確認に使用したモルタルの配合

	W/C (%)	活性 アルミナ (%)	S/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	ポルトランド セメント	活性 アルミナ	細骨材	AE 減水剤
W50A0	50	0	3	257	513	0	1540	0.0
W60A0	60	0		293	488	0	1464	0.0
W60A5		5		254	434	91	1301	C×1.5%
W65A0	65	0		310	477	0	1430	0.0
W65A5		5		270	425	89	1274	C×1.5%
W90A0	90	0		383	426	0	1277	0.0
W90A10		10		306	346	154	1038	C×1.5%
W90A15		15		276	312	220	935	
W100A10	100	10		315	320	178	960	
W100A15		15		298	302	213	907	

### 4.3 内部空隙の確認

これまで推察された温度上昇抑制メカニズムの根拠となる空隙の確認を目的として、以下の実験を行った。なお供試体は表-4.5 に示す配合で昨年作製したものをを使用した。

#### 4.3.1 細孔径分布試験

実験に用いたモルタル供試体の計画配合を表-4.5 に示す。各モルタルの W に続く数値は水セメント比を表し、A に続く数値は活性アルミナ粉末の混入率を表す。モルタル供試体を W/C50、W/C60、W/C90、W/C100 の4種類とし活性アルミナ粉末は A0、A5、A10、A15 を用いた。細孔径分布測定用のモルタル供試体をコンクリートカッターで切断し、一辺の長さ 2.5~5mm の立方体状の試料片とし、真空乾燥を行った後に、測定範囲  $256\mu\text{m}\sim 3\text{nm}$  のカルロ・エルバ社製の水銀ポロシメーター（図-4.2）を使用して、水銀圧入法により行った。



図-4.2 水銀 Pascal440(左)・140(右)

#### 4.3.2 光学顕微鏡

図-4.3 に示す倍率 800 倍の光学顕微鏡を用いて供試体断面の観察を行う。使用する供試体は W50A0、W100A15 で、予めコンクリートカッターで切断したのち水で表面を洗い流したものをを用いた。

#### 4.3.3 走査型電子顕微鏡

図-4.4 に示す走査型電子顕微鏡を用いて供試体断面の観察を行う。供試体は W50A0、W60A0、W60A5、W100A15 の 5 配合を使用した。供試体を砕き、直径 200mm のパイプを厚さ 5mm に切った物に入れ、真空状態において樹脂で固めた後、研磨をして観察を行う。



図-4.3 光学顕微鏡



図-4.4 走査型電子顕微鏡



#### 4.3.4 見掛気孔率の測定

以下の(4)式を用いて各供試体3本ずつ質量計測を行う。絶乾重量は恒量となるまで  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  環境で保管した後、供試体が室温に戻った時の質量とする。飽水質量は約  $20^{\circ}\text{C}$  の水中に 120 時間浸水した後表面水を拭った時の質量とする。見掛気孔率とは閉口気孔容積のカサ容積に対する百分率のことであるが、本研究では供試体内部まで水が浸透するのに時間を要するため一部開気孔の容積も含まれており、これを全気孔容積とする。

$$P_0 = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (4)$$

ここで  $P_0$ ：見掛気孔率(%),  $W_1$ ：絶乾質量(g),  $W_2$ ：飽水試料の水中質量(g),  $W_3$ ：飽水試料の質量(g)

#### 4.4 内部空隙と水分移動

既往の研究の保水量試験より、活性アルミナ粉末を 15% 混入することで普通モルタル(W/C50%)と比較して約 2 倍保水できることが明らかになった。しかし、長期にわたる水分量変化の調査が行われておらず、今回新たに配合を追加し、期間を延ばして再実施した。

##### 4.4.1 活性アルミナ粉末混入モルタルの作製方法

モルタルの練混ぜ方法は JIS R 5201:1997 に準拠しモルタル供試体成形用三連型枠を用いて  $40\times 40\times 160\text{mm}$  のモルタルを作製し、テーブルバイブレーターを使用して締め固めを行った。脱型は、打設後 1 日で行った。モルタルを所定の試験材齢まで  $20^{\circ}\text{C}$  で水中養生する。ただし、空隙の多い W/C100%を超える供試体に関しては、水中養生では硬化しなかったため  $20^{\circ}\text{C}$  の室内で水を張った密閉容器に入れ気中養生を行った。

##### 4.4.2 保水性試験

保水性試験は JIS A 5371 に準拠した<sup>4)2)</sup>。湿潤重量は  $15\sim 25^{\circ}\text{C}$  の清水中で 24 時間吸水させた後、供試体を取り出し密閉式のプラスチック容器に入れ  $15\sim$

30℃の室内で 30 分間水を切り、絞ったウエスで見に見える水膜を拭った後、直ちに計測した質量とする。絶乾重量は恒量となるまで 105±5℃環境で保管した後、供試体が室温に戻った時の質量とする。保水量は以下の (5) 式から求めた。

$$W = \frac{M_w - M_d}{V} \quad (5)$$

$W$ : 保水量(g/cm<sup>3</sup>)、 $M_w$ : 湿潤質量(g)、 $M_d$ : 絶乾質量(g)、 $V$ : 試験体体積(cm<sup>3</sup>)

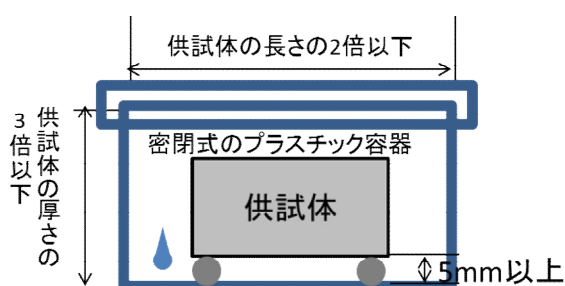


図-4.5 保水量試験装置の概略図

#### 4.4.3 吸水性試験

吸水性試験は JIS A 5371 を参考に行った。吸い上げ高さを算出するための試験であるが、吸水速度を同時計測するため、供試体を図-4.6 のようにスポンジ上に設置し 15～25℃の清水中で 5、10、30、60、90 分、2、4、6、12、24 時間、2、3、5 日吸水させ絞ったウエスで見に見える水膜を拭った後、直ちに質量を計測する。水位は供試体底面 5mm の高さとなるようにする。JIS では、30 分後の質量を基準として使用しているが、本研究における供試体は吸水量が多いため、上記の時間に変更して行った。

$$W = \frac{M_w - M_d}{V} \quad (6)$$

$W$ : 吸水量(g/cm<sup>3</sup>)、 $M_w$ : 湿潤質量(g)、 $M_d$ : 絶乾質量(g)、 $V$ : 試験体体積(cm<sup>3</sup>)

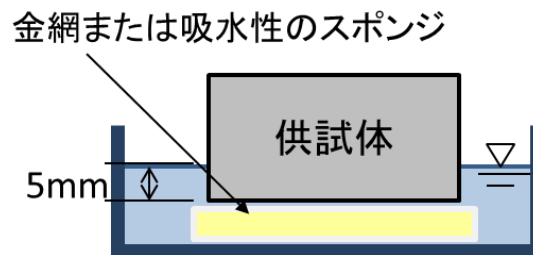


図-4.6 吸水量試験装置の概略図

#### 4.4.4 吸上げ高さ試験

図-4.7 に示す実験装置を用いて、経時変化ごとに表面の色が変化した高さに線を引き、吸い上げ高さを調査した。使用した供試体は W50A0、W60A0、W60A5、W100A15 である。供試体はモルタルバーを使用したため、16cm 以上吸い上げた時のためにスポンジを挟んで 2 本用いた。

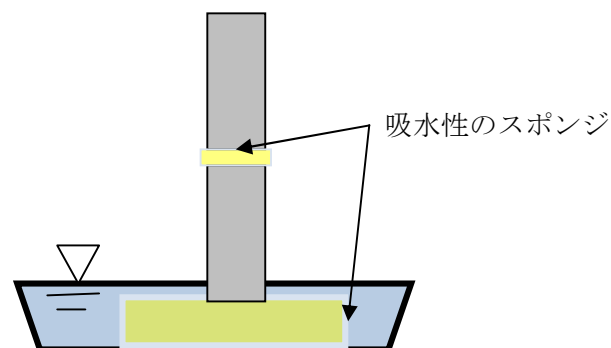


図-4.7 揚上試験装置の概略図

### 4.5 実証試験結果と考察

#### 4.5.1 建屋測定結果

図-4.8～図-4.11 に建屋の温度変化の結果を示す。図-4.8 より、屋根部で比較した場合、普通コンクリートが 47.0℃の時、活性アルミナ粉末混入モルタルは 34.0℃であり、最大 13.1℃の温度差が確認できた。温度差が出た要因は気化

熱によるものであり、モルタル製作時の練混ぜ水の一部が活性アルミナに吸水されてしまうために、水セメント比 100% と高く、その過剰水がモルタルの硬化過程において、微細な孔となりポーラス状になる。その孔がセメント内部にある活性アルミナへの吸着誘導孔となり、また活性アルミナ自身が持っているナノサイズの微細孔と相まってセメント硬化体の気化効率が向上したと考えられる。換言すれば、セメントペーストレベルのポーラス化である。

図-4.9 より、壁部材では普通コンクリートの最大 42.1℃ に対し、活性アルミナ混入モルタルは 37.4℃、このとき外気温は 32.7℃ であった。普通コンクリートと活性アルミナ混入モルタルの表面温度差は 4.7℃ であった。屋根の程は、温度差に差が出なかった理由としては、高い単位水量によって出来た活性アルミナ混入モルタル内部の細孔が連続しているためと考えられる。すなわち、壁が垂直のため水が連続的な細孔を通じて下方向へ移動し、計測位置における蒸散作用が減少し、表面温度低下量が小さくなったと考えられる。

図-4.10 より、建屋内部の最大温度は、普通コンクリートを使用した場合 45.7℃、活性アルミナ混入モルタルを使用した場合には 40.8℃ で、その差は 4.9℃ であった。室内は窓がなく熱が外に逃げないことで外気に比べて高温になったものの、普通コンクリートと比べて温度上昇を抑制することが明らかになった。図-4.11 は冬に測定した建屋内部の温度変化であるが、2 棟に差はなかった。開発品は従来品と比較し熱伝導率が低く、外気温度による室内の温度影響が低い。そのため、従来品と差がなかったと思われる。なお、測定期間中に降雪や零下の気温になったが、凍結融解によるひび割れ等の冬場の問題は確認されなかった。

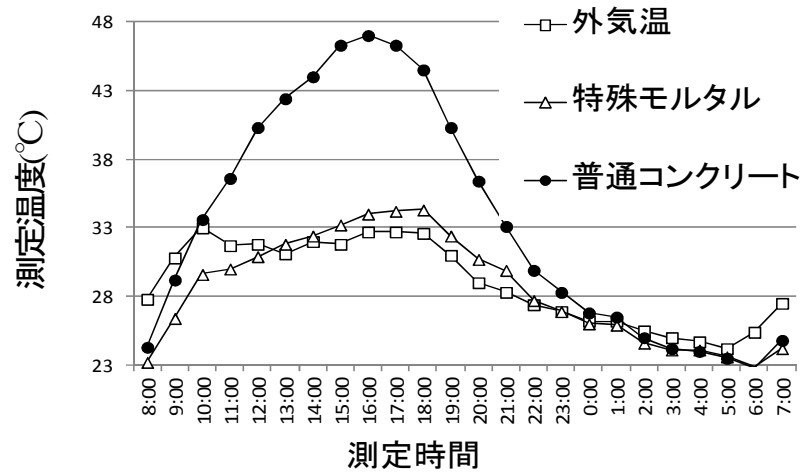


図-4.8 建屋屋根の温度変化

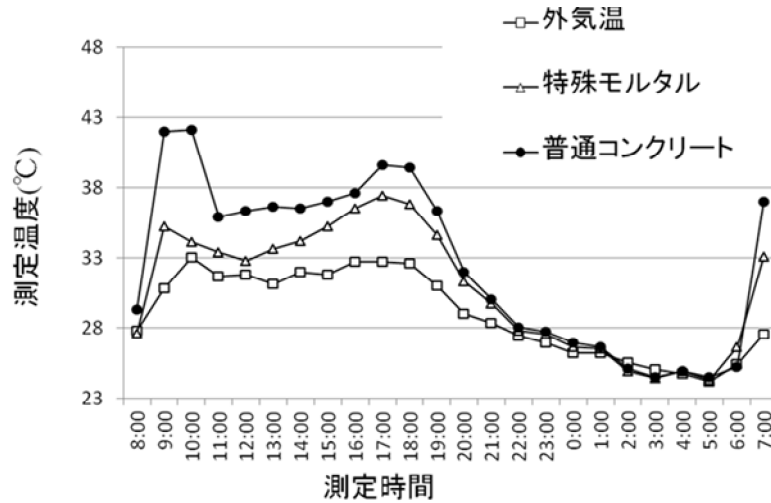


図-4.9 建屋壁の温度変化

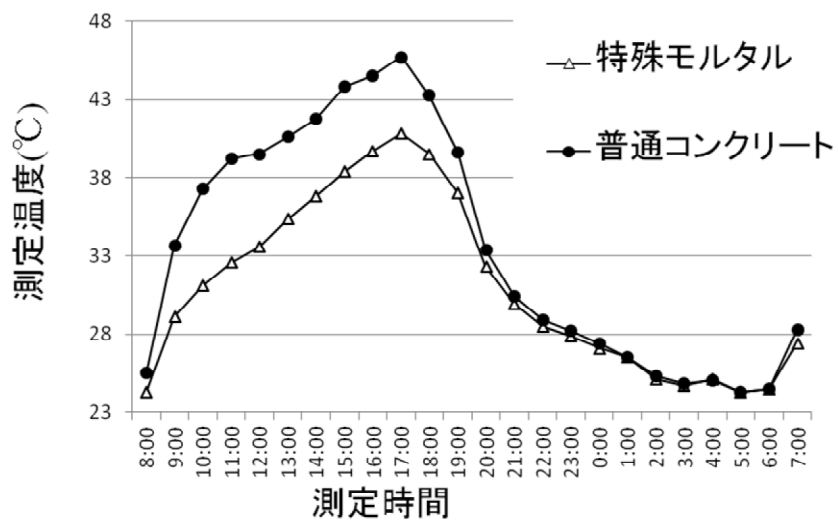


図-4.10 建屋内部の温度変化

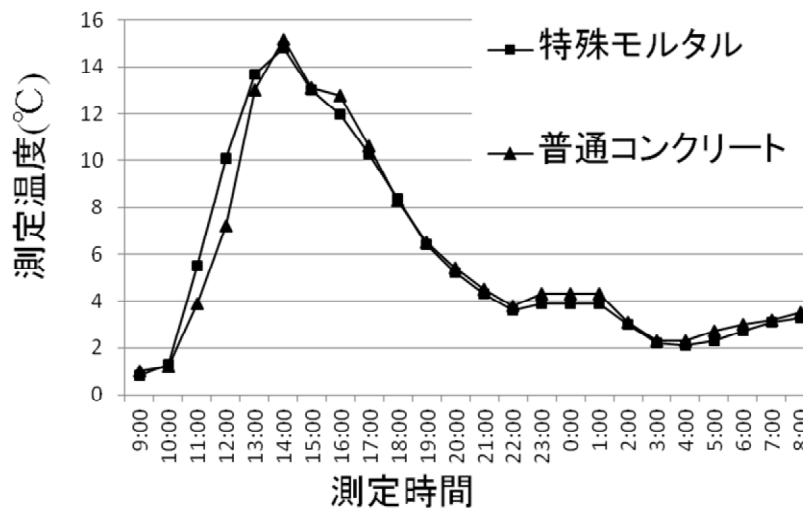


図-4.11 冬季の建屋内部の温度変化

図-4.12 と図-4.13 に建屋の温度変化の結果を示す。屋根の最大温度は活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋が 28.5℃、白色セメントモルタルの屋根が 32.3℃で最大温度差は 3.8℃であった。建屋内部の最大温度は活性

アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルが 33.6℃、白色セメントモルタルが 35℃で最大温度差は 1.4℃であった。

活性アルミナ粉末混入したモルタルはポーラス化し活性アルミナ粉末を入れていないモルタルより多くの水を保水する。保水した水の量が多いため、蒸発する水の量も多くなり気化熱による温度差が表れたと考えられる。測定開始時とその24時間後に屋根の含水率を接触型の簡易デジタルモルタル水分計を用いて測定したところ測定開始時は双方とも含水率が 15%以上（測定限界が 15%）あった。24 時間後は活性アルミナを入れた白色セメントのモルタル屋根は 10%で白色セメントモルタルの屋根は 3.1%と 7%の差が出た。白色セメントモルタルの屋根は含水している水の量が少なく 24 時間で含水の多くを蒸発したため含水率が低くなった。

建屋内部の温度は日光が直接当たる建屋屋根と比べて温度が高くなった。建屋内部は建屋屋根と比べ密閉空間のため熱が放出されにくく建屋屋根は外気に

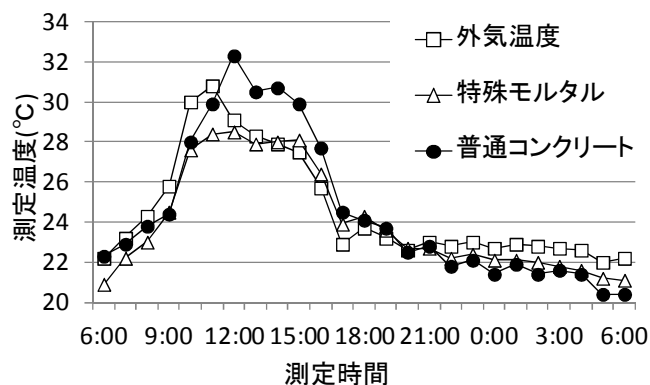


図-4.12 建屋屋根の温度変化

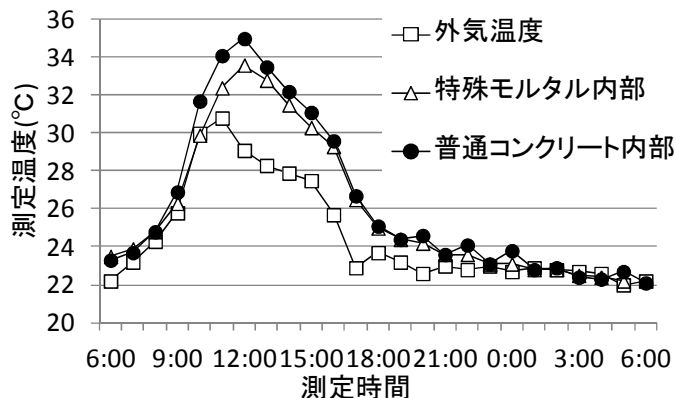


図-4.13 建屋内部の温度変化

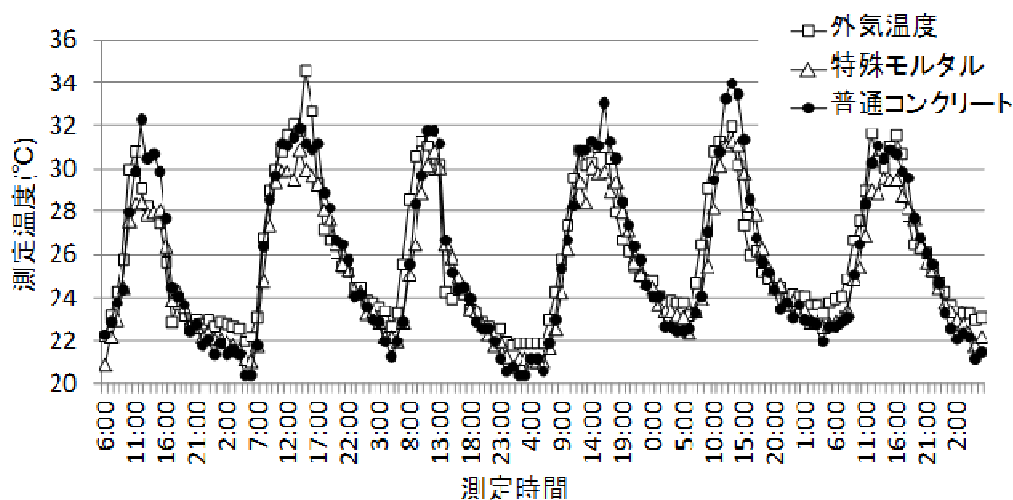


図-4.14 晴天時建屋屋根の6日連続測定

熱が放出されやすいためである。15:00 以降の建屋内部の温度降下の程度は両建屋ではほぼ一致している。これよりモルタルから発生する気化熱による建屋内部の温度は気化による影響はないと考えられる。建屋内部をサーモグラフィで撮った写真を写真-4.1 から写真-4.4 に示す。

図-4.14 に建屋の連続温度測定の結果を示す。建屋の保水能力の持続性を見るために6日間の連続測定を行った。図-4.14の温度から白色セメントモルタルの屋根と活性アルミナを入れたモルタルを塗った屋根とでは常に活性アルミナを入れたモルタルの屋根が優位を保ち保水性能の低下は見られなかった。

図-4.15、図-4.16 に建屋の屋根と内部の温度比較を示す。活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は、屋根の温度は気化熱によって上昇が抑制されているが内部の温度上昇は抑制されていない。昼間の屋根と内部の温度差が大きい。日没後の内部の温度は屋根の温度と漸近し、屋根から内部への熱の伝達は少ない。一方、白色セメントモルタルの建屋は、屋根と内部の温度差は小さく屋根の温度上昇抑制効果は少ない。日没後の内部の温度は屋根の温度より高く、先の活性アルミナ粉末混入白色セメントモルタルの建屋と比較して、屋根から内部に熱が伝達される熱量が大きいと考えられる。

図-4.17 に雨天時の建屋屋根の温度変化の結果を示す。測定した日の天気は午



前中曇りで昼間晴れたが 13 時過ぎに雨が降り始めた。降雨時から白色セメントモルタルの温度も活性アルミナ粉末混入白色セメントモルタルも温度数値に差が無く保水モルタルの気化熱による影響が無く白色セメントモルタルと同様の効果になった。これは、晴れている時と違いコンクリートに蓄積されている熱量が雨水によって急速に冷やされたためである。



写真-4.1 活性アルミナ使用建屋内部



写真-4.2 建屋内部

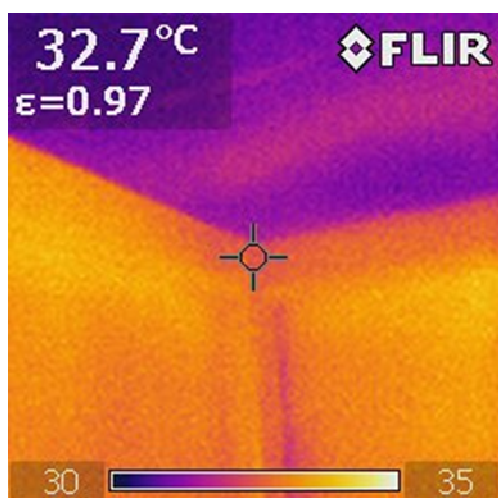


写真-4.3 活性アルミナ使用建屋内部  
(サーモグラフィ)

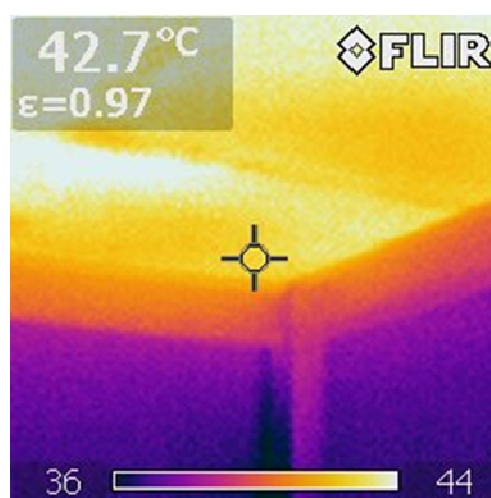


写真-4.4 建屋内部  
(サーモグラフィ)

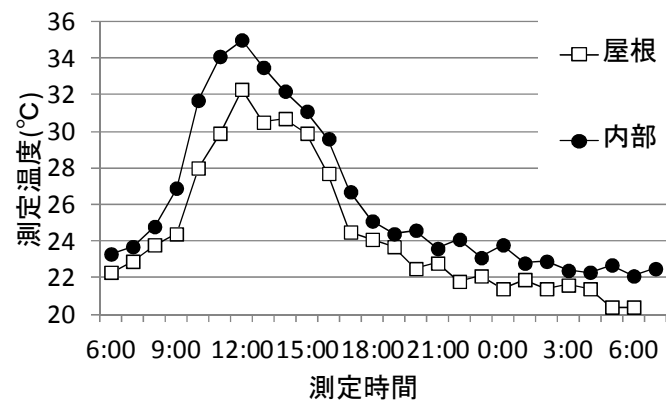


図-4.15 建屋の屋根と内部の温度

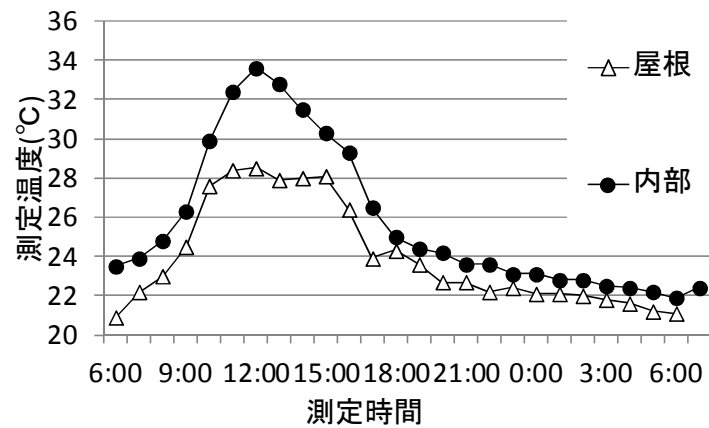


図-4.16 活性アルミナ使用建屋屋根と内部の温度

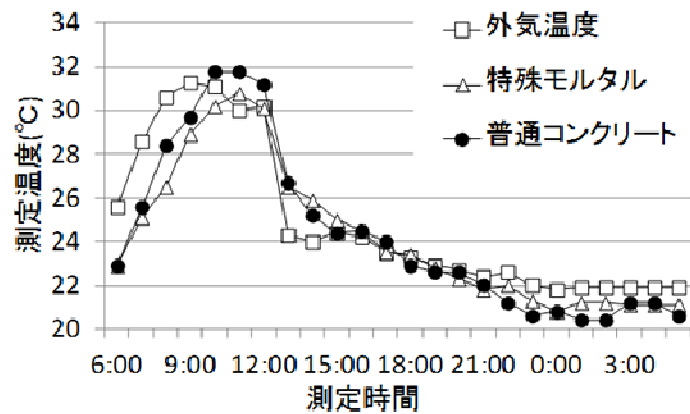


図-4.17 降雨による温度変化

#### 4.5.2 モルタルの細孔分布測定

図-4.18 に通常のモルタルと活性アルミナを入れたモルタルの細孔分布を測定した結果を示す。W/C が増加し、活性アルミナ粉末混入率が増加するに従い、総細孔量が増加する。これは、ポーラス化を意味する。

直径  $0.3\sim 256\mu\text{m}$  の細孔容積は W/C および活性アルミナ粉末の混入量とともに増加している。しかし、この範囲の細孔直径をもつ細孔量の増加は、W/C とアルミナ混入量増加のどちらによるものか明確に区別をつけることは難しい。W50A0 と W60A を比較した場合、 $0.3\sim 1\mu\text{m}$  の細孔が増加している。しかし、同 W/C である W60A0 と W60A5 においても、増加がみられることから、 $0.3\sim 1\mu\text{m}$  の細孔直径をもつ細孔容積は W/C の増加単体によるものではないと考えられる。 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 、 $0.03\sim 0.1\mu\text{m}$  の細孔は W/C や活性アルミナ粉末の有無に関わらずほぼ差がない。したがって、 $0.3\mu\text{m}$  以下の細孔は本研究対象のポーラス化のレベルの細孔ではないと考えられる。一方、 $0.003\sim 0.01\mu\text{m}$  の細孔は、活性アルミナ粉末が入っているモルタルの活性アルミナ粉末の量に比例しており、細孔径がナノサイズであることから、活性アルミナ粉末自身の細孔であると考えられる。

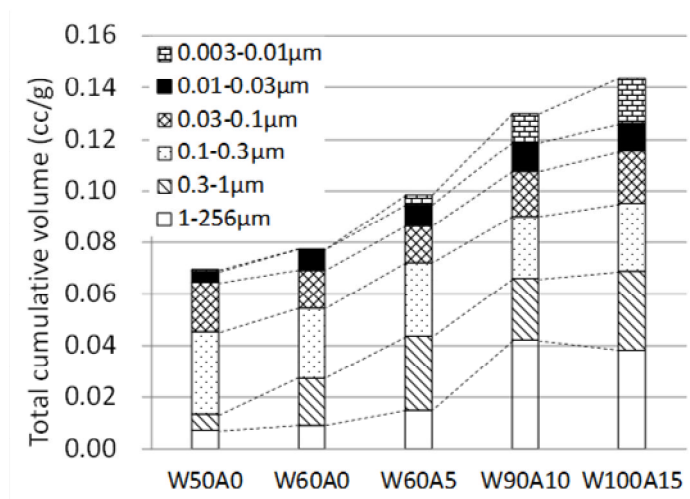


図-4.18 モルタルの細孔分布測定

図-4.19、図-4.20 および図-4.21 に活性アルミナ粉末混入率と直径別の細孔量を示す。直径  $0.03\sim 0.003\mu\text{m}$ 、 $256\sim 0.3\mu\text{m}$  の細孔において、活性アルミナ粉末混入

率との相関係数を算出すると直径  $0.03\sim0.003\mu\text{m}$  との相関係数  $R^2=0.9729$ 、直径  $256\sim0.3\mu\text{m}$  との相関係数  $R^2=0.9029$  となり、ともに高い相関性が得られた。しかし、図-4.15 に示す直径  $0.3\sim0.03\mu\text{m}$  の細孔において、活性アルミナ粉末混入率との相関係数を算出すると  $R^2=0.0225$  となりこの直径の細孔量は活性アルミナ粉末混入率に依存しなかった。これらのことから、高 W/C 化、活性アルミナ粉末混入率の増加に伴い細孔量が増加すること、活性アルミナ粉末の混入率の増加は特定の細孔径（直径  $0.03\sim0.003\mu\text{m}$ 、 $256\sim0.3\mu\text{m}$ ）における細孔量の増加に寄与していることがわかった。

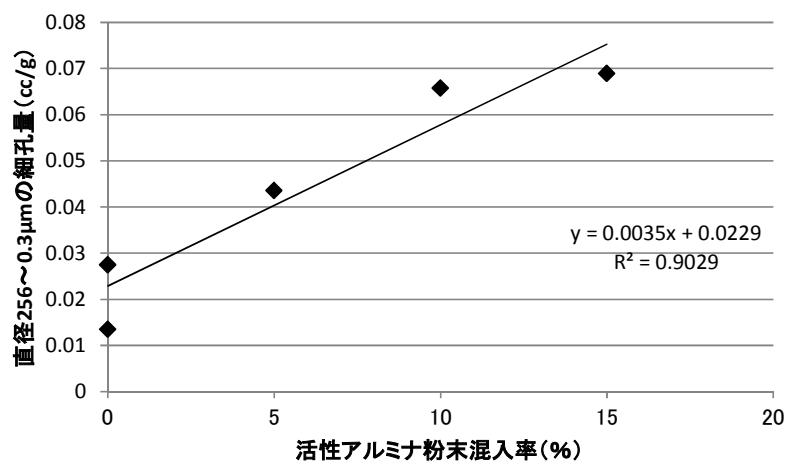


図-4.19 活性アルミナ粉末混入率と直径  
256~0.3 μm の細孔量との相関図

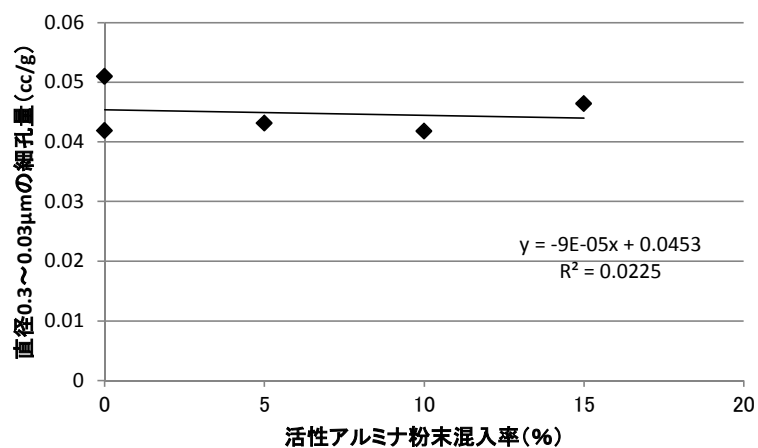


図-4.20 活性アルミナ粉末混入率と直径  
0.3~0.03 μm の細孔量との相関図

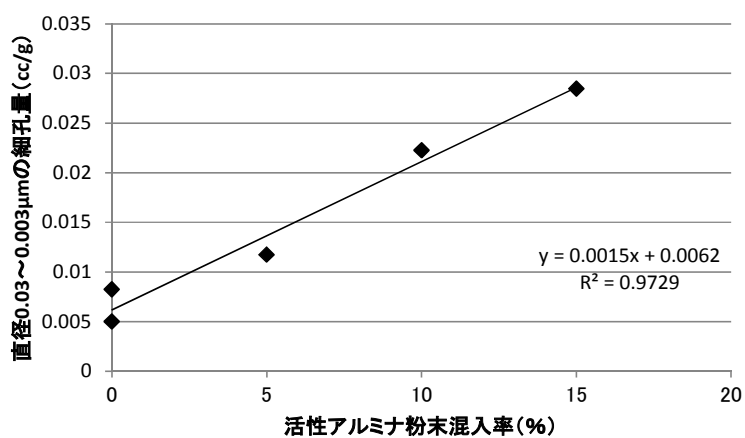


図-4.21 活性アルミナ粉末混入率と直径  
0.03~0.003 μm の細孔量との相関図

#### 4.5.3 光学顕微鏡結果

最大倍率を用いたが、空隙を確認することはできなかった。よって、走査型電子顕微鏡により、精度及び倍率を上げて観察を行うこととした。

#### 4.5.4 走査型電子顕微鏡結果

図-4.22 から図-4.24 に W50A0、W60A5、W100A15 の SEM 観察画像を示す。確かにモルタルには、細孔が存在し、活性アルミナ粉末混入と含まないモルタルを比較した場合、空隙量が増えていることが明らかとなった。また細孔細孔径分布と同じ径の細孔を確認することができた。

よって細孔径分布計測および走査型電子顕微鏡の結果により、モルタルのポーラス化が確認された。

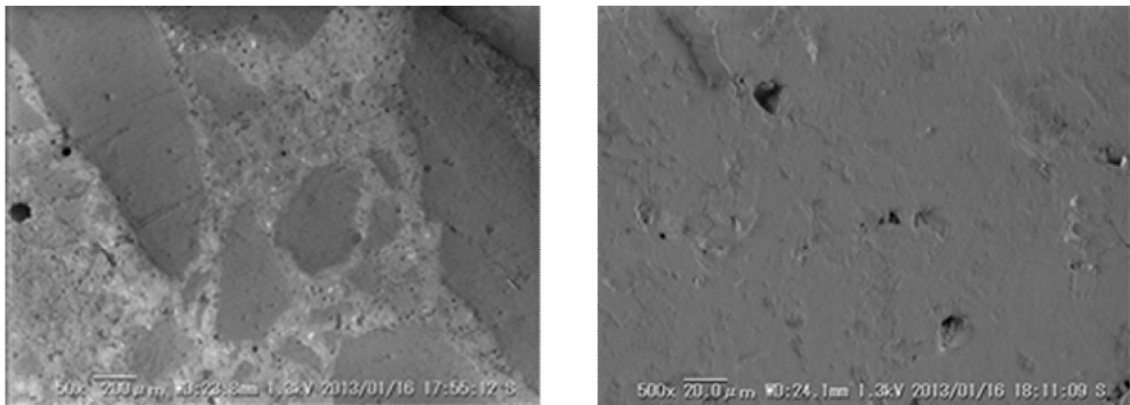


図-4.22 W50A0SEM 画像(左 50 倍, 右 500 倍)

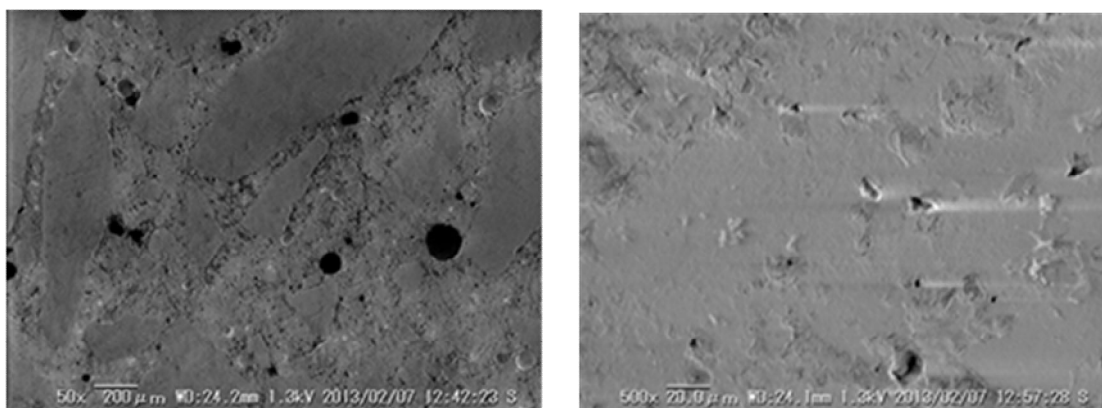


図-4.23 W65A5SEM 画像(左 50 倍, 右 500 倍)

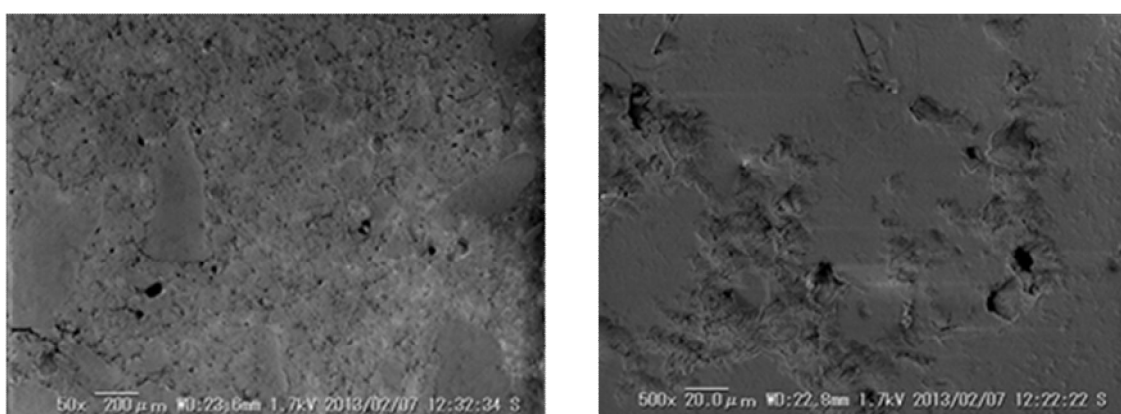


図-4.24 W100A15SEM 画像(左 50 倍, 右 500 倍)

#### 4.5.5 見掛気孔率の測定

見掛気孔率の測定結果を表-4.5 に示す。W/C および活性アルミナ粉末混入率が高いほど、気孔率が増加していることがわかる。ただし、W90A15 は W90A10 よりも空隙率が低くなっており、空隙量が減っていることが分かる。これは W/C に対して活性アルミナ粉末混入量が多く、細孔が形成されにくいことが原因であるといえる。

表－4.5 見掛気孔率

	見掛気孔率(%)
W50A0	19.2
W60A0	21.9
W60A5	22.0
W65A0	22.9
W65A5	23.5
W90A0	27.0
W90A10	29.9
W90A15	28.4
W100A10	30.0
W100A15	30.2

#### 4.5.6 保水性試験結果

図-4.25 に保水性試験結果を示す。W/C の増加に伴って保水量が増加している。これは、昨年の試験と同様の結果である。細孔径分布の結果から、供試体のポーラス化による空隙量の増加が保水量の増加に繋がったといえる。昨年の結果より W100A15 の保水量が減少したものの、W50A0 と比較して約 2 倍の保水量を付与させることが可能であることがわかる。

また、配合の種類を増やし W60A0 と W60A5 の結果を得たことで、活性アルミナ粉末を混入することによる保水量の増加は微量であることがはっきりと示された。ただし、W/C90%以上の高 W/C の配合では見掛空隙率の結果同様、活性アルミナ粉末の混入量によって保水量に差が出る結果となった。これは、高吸水性の活性アルミナ粉末を混入しない場合は材料分離を起こし、内部に空隙が増えたことで保水量が増加したためであるといえる。よって、W/C ごとに施工に適した活性アルミナ粉末混入量が存在し、活性アルミナ粉末は混入量を調整することで高 W/C であっても成形を可能にするといえる。



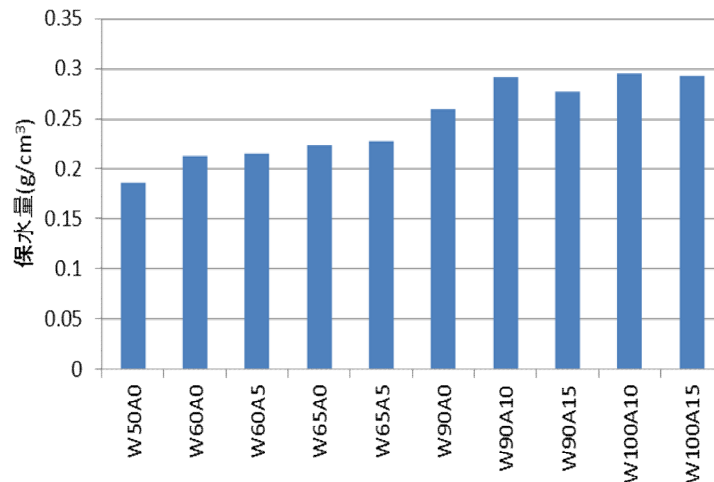


図-4. 25 保水性試験結果

#### 4. 5. 7 吸水性試験結果

図-4. 26 に吸水量の経時変化を示す。試験開始から 48 時間ですべての配合の吸水量が収束している。試験終了の 120 時間における総吸水量は W50A0 の配合の吸水量が最も小さく、高 W/C の配合ほど吸水量が大きくなる傾向がみられる。

同 W/C であっても、これまでの結果と同様に W60、W65 において A0 と A5 が開始後 12 時間付近で入れ替わっていることが分かる。また、計測初期は W100A10 の吸水量が最大であるが、2 時間経過後は W100A15 の吸水量が W100A10 の吸水量に追いつき値が収束している。活性アルミナ粉末混入率の高い供試体では、空隙の径が小さいものが多いために初期の吸水量が小さくなったと考えられる。しかし、保水・吸水するための空隙の総量は多いため計測後半になるにつれて吸水量が増加し、活性アルミナ粉末混入率が高い配合の吸水量は最終的には活性アルミナ粉末混入率が低い配合の吸水量を逆転したと考えられる。

W90A10、W100A10 を除いては、W/C および活性アルミナ粉末の混入率が高いほど単位体積当たりの吸水量が増加するといえる。細孔径分布を実施した配

合については、細孔量の順位と吸水量の大小関係が一致するため、細孔径分布計測を行っていない配合に関しても内部空隙の量が吸水量と比例するといえる。

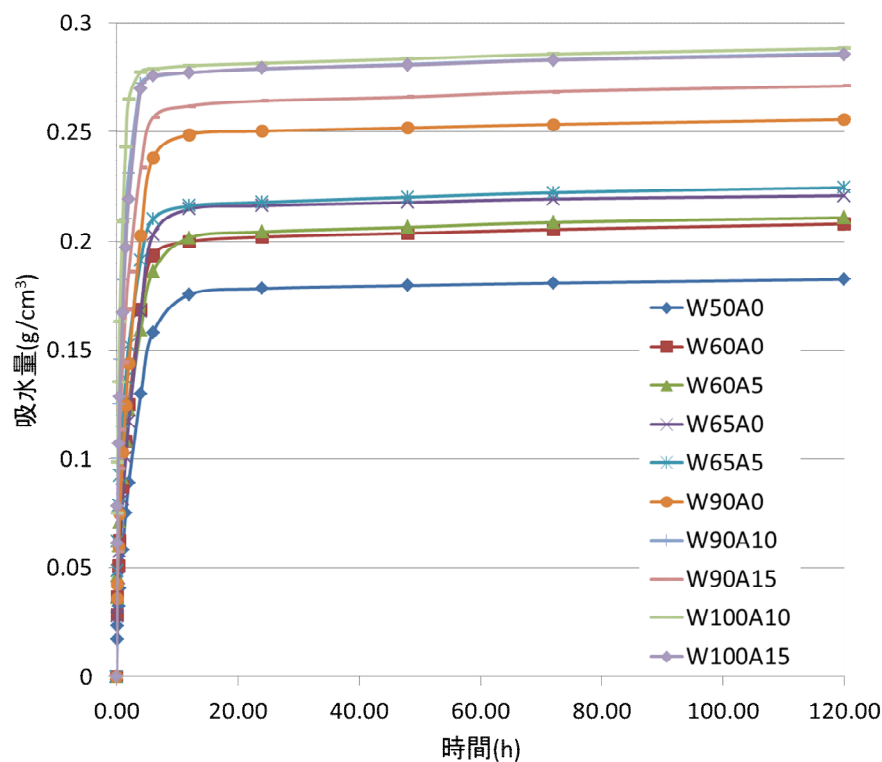


図-4. 26 吸水量の経時変化

図-4. 27 に吸水速度の結果を示す。本研究において、試験時間を延ばしことにより昨年と比較して、細やかな変化を観察することが可能となった。

吸水速度のピークは全配合において、試験開始 10 分でみられることが明らかとなった。

吸水速度は、高 W/C であるほど、またアルミナの混入量が多いほど早くなる傾向がみられた。これは、活性アルミナ粉末を混入したことで材料分離が防がれ、微細な空隙が増加したためである。

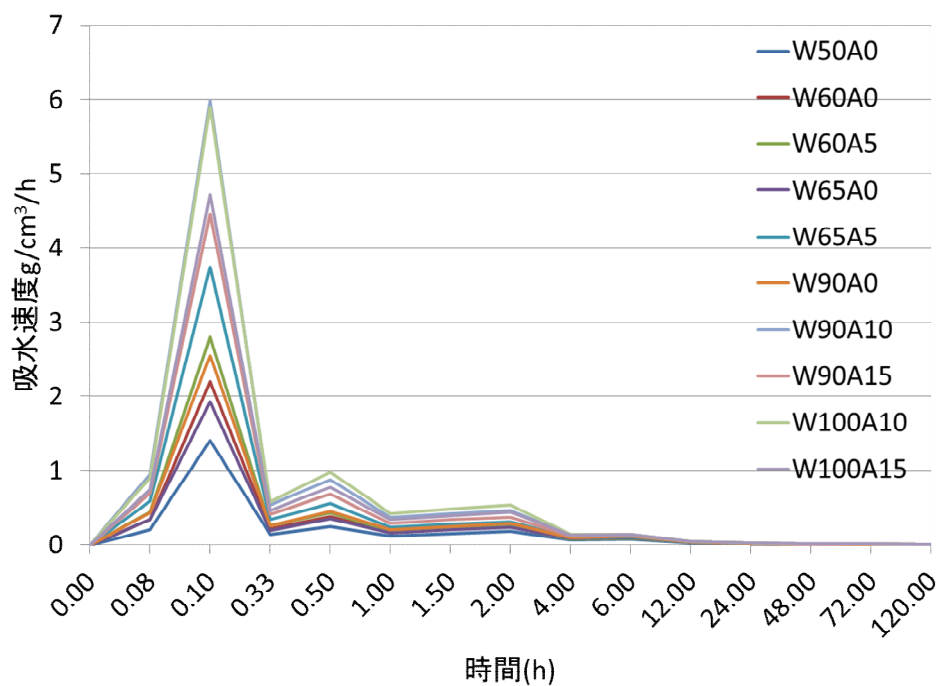


図-4.27 吸水速度の経時変化

#### 4.5.8 給水高さ測定結果

24 時間後の吸上高さ計測結果を表-4.6 に示す。24 時間後の各供試体の写真を図-4.28 に示す。ただし、W90A0、W90A10 は試験開始 48 時間後の供試体である。

活性アルミナ粉末混入量および W/C の増加に伴い、吸上げ高さが高くなっている。これにより高 W/C 化および活性アルミナ粉末高混入率によって得られる内部空隙が連続していることが分かる。

表-4. 6 吸上げ高さ

	実験値 (cm)
W50A0	6
W60A0	6. 5
W60A5	7
W90A0	8. 5
W90A10	12. 5
W100A15	10



図-4. 28 吸上げ開始 24 時間後の供試体

## 4.6 結論

本章で得られた結論を以下に示す。

- (1) 活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は白色セメントモルタルの建屋に比べ建屋のコンクリートの温度及び建屋内部の温度も低くなり気化熱による温度抑制効果が有る。
- (2) 6日間連続で測定したデータから活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は常に白色セメントモルタル建屋より温度が低くなっていることから、太陽からの熱量による含水の蒸発以外の含水量のロスを減らし性能を維持していることがわかる。
- (3) 水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った結果、W100A15 の総細孔量はW50A0 の総細孔量の約2倍であり、活性アルミナ粉末混入率の増加に従い、直径 0.003~0.03 $\mu\text{m}$ 、0.3~256 $\mu\text{m}$  の細孔の増加が確認され、モルタルのポーラス化が実証された。
- (4) 走査型電子顕微鏡よりモルタルには、細孔が存在し、活性アルミナ粉末混入と含まないモルタルを比較した場合、空隙量が増えていることが確認できた。
- (5) 高W/Cのモルタルを作製するとき活性アルミナ粉末を混入しない場合は材料分離を起こす。よって、W/Cごとに施工に適した活性アルミナ粉末混入量を調整することで高W/Cであっても成形を可能になる。これは、活性アルミナ粉末を混入したことで材料分離が防がれ、微細な空隙が増加したためである。
- (6) 吸水高さ測定から、活性アルミナ粉末混入量およびW/Cの増加に伴い、吸上げ高さが高くなる。このことから、高W/C化および活性アルミナ粉末高混入率によって得られる内部空隙が連続していることが分かる。

## 参考文献

- 4-1) 松下博道ほか：再生骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.230-242，2006.
- 4-2) JIS Translated and published by Japanese standards Association JIS A 5371 Physical testing methods for cement

## 第5章 活性アルミナを混入したモルタルの耐久性の検討

### 5.1 はじめに

第3章から、セメントに活性アルミナを混入することにより必要な W/C の量が通常よりも多く必要になりモルタルのポーラス化が起きることが分かった。本章では、ポーラス化によるモルタルの強度低下を圧縮強度試験、曲げ強度試験、高 W/C 化により懸念される乾燥収縮についての長さ変化試験、モルタル内部のポーラス化で発生した細孔が与える耐凍害性を簡易凍結融解試験によって検討した。

表-5.1 圧縮強度、曲げ強度試験で使用した各モルタルの配合

記号	W/C (%)	活性アルミナ粉末混入 率（全容積百分率） (%)	S/C	単位量（kg/m <sup>3</sup> ）				
				W	C	S	活性アル ミナ粉末	AE 減水剤
50A0	50	0	3	293	586	1758	0	0
W60A5	60	5		327	545	1634	132	8.16
W65A5	65			350	539	1616	132	8.09
W70A15	70	15		334	477	1431	396	7.15
W75A15	75			354	472	1416	396	7.07
W80A15	80			374	467	1401	396	6.99
W85A15	85			393	462	1386	396	6.91
W90A15	90			412	457	1372	396	6.88
W95A15	95			430	453	1358	396	6.80
W100A15	100			438	438	1314	386	6.72
W105A15	105			466	444	1331	396	6.64
W110A15	110			483	439	1318	396	6.60
W115A15	115			629	572	1717	515	6.52
W120A15	120			517	431	1293	396	6.48

### 5.2 圧縮強度試験、曲げ強度試験概要

#### 5.2.1 圧縮強度試験、曲げ強度試験で使用したモルタルの配合

表-5.1 にそれぞれのモルタルの配合を示す。各モルタルの W に続く数値は水

セメント比を表し、A に続く数値は活性アルミナ粉末の混入率を表す。活性アルミナ粉末の混入率を 15% 一律とし、W/C を変化させた。ただし、W/C60、65% は単位水量が少なく、活性アルミナ粉末の吸水量が非常に多く作製が困難であったため、活性アルミナ粉末の混入率を 5% にした。比較のため普通モルタル (W/C50%、混入率 0%) も用意した。

### 5.2.2 活性アルミナ粉体モルタル作成

練混ぜ方法は JIS R 5201:1997 に準じる。

上記の手順で行い、モルタル供試体成形用三連型枠を用いて 40×40×160mm の角柱モルタルを作製した。

### 5.2.3 圧縮強度試験、曲げ強度試験

圧縮強度試験及び曲げ強度試験は材齢 7、14、28 日に JIS R 5201:1997 に準じて行う。角柱モルタルを所定の試験材齢まで 20℃ で水中養生した。ただし、空隙の多い W/C100% を超える試験体に関しては、水中養生では硬化しなかったため 20℃ 湿度 100% の気中養生を行った。

### 5.2.4 圧縮強度試験、曲げ強度試験結果

焼成ブロックの強さの指標は、そのほとんどが曲げによって破壊されるため、以後曲げ強度について検討する。図-5.1 より、材齢が経過するに従ってセメント水和反応によって強度が増進している。JASS 7 M 101 インターロッキングブロックの品質規格において、歩行者系道路の曲げ強度規定が 3.0N/mm<sup>2</sup> であり、作製が困難であった W70A15～W80A15 を除くすべての試験体は材齢 14 日にはこの規定を満足している。

#### 1) W/C の変化

W70A15～W80A15 を除き、活性アルミナ粉末モルタルの強度は W/C が増えるに従って低下する。図-5.1 に材齢 7、14、28 日のセメント水比 (C/W) と曲げ強度の関係を示す。材齢によらず相関性を示している。W70A15～W80A15 を除く混入率の多い試験体も養生時間を長く取ることによって強度増進を

図ることができる。

## 2) 活性アルミナ粉末の混入率

W70A15～W80A15 を除く活性アルミナ粉末の混入率 15%の試験体について、材齢 7 日の W100A15 強度が落ちているのは、モルタルが材料分離を起こしたためだと考える。図-5.3 より、材齢に関係なく曲げ強度と C/W は比例する。また、材齢が進行するに従い同一 C/W での曲げ強度は増加すると言える。活性アルミナ粉末混入がセメントの水和反応過程に悪影響を及ぼすことはない。

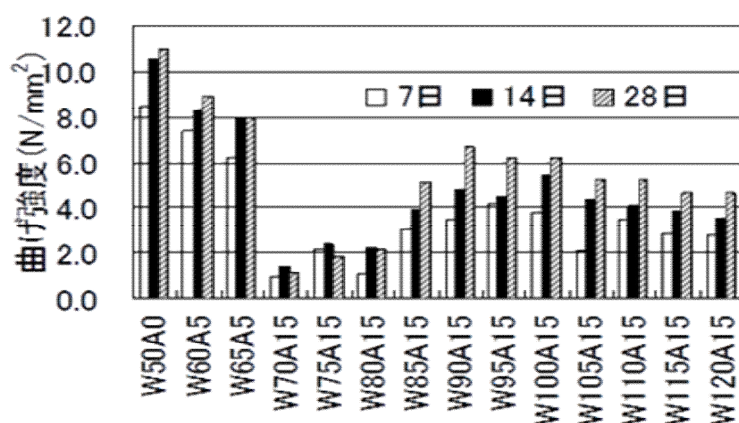


図-5.1 曲げ強度試験結果

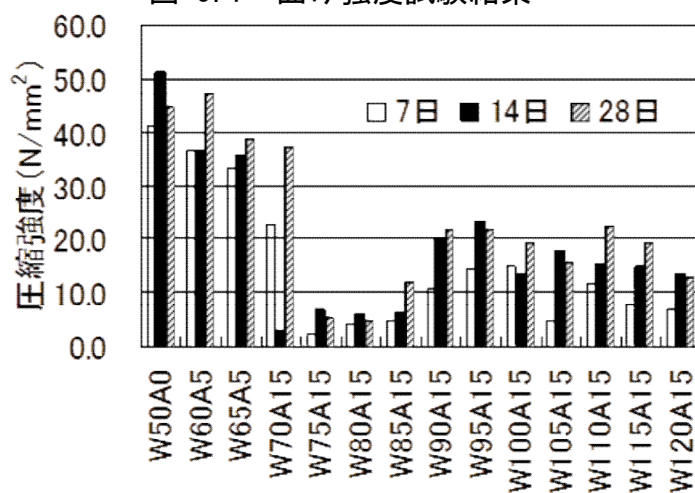
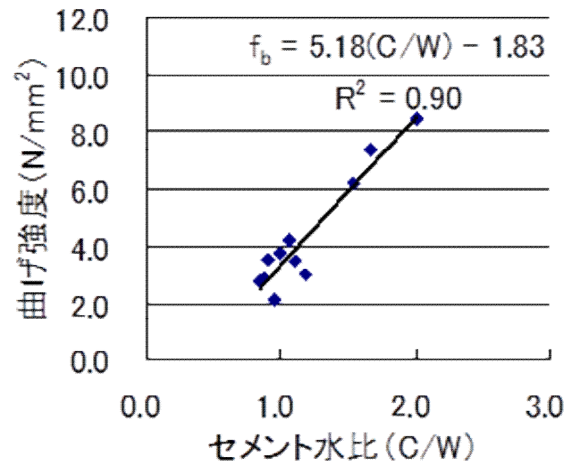


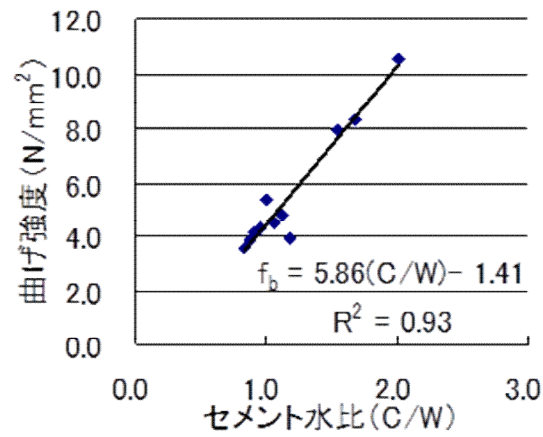
図-5.2 圧縮強度試験結果



材齢 7 日目



材齢 14 日目



材齢 28 日目

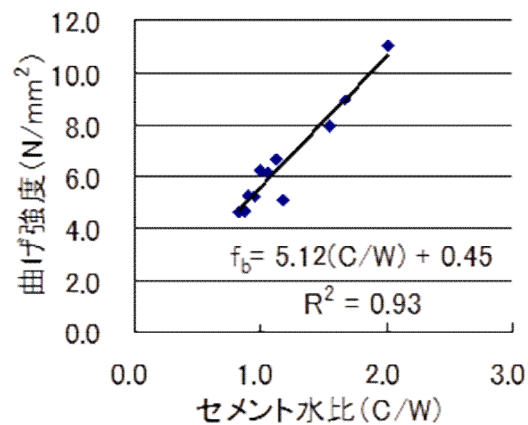


図-5.3 材齢 7, 14, 28 日におけるセメント水比 (C/W) と曲げ強度の関係

### 5.3 長さ変化試験概要

#### 5.3.1 長さ変化試験で使用したモルタルの配合

表-5.2にそれぞれのモルタルの配合を示す。2.3.4と同様の方法で行い、モルタル供試体成形用三連型枠を用いて40×40×160mmの角柱モルタル及びφ100×200mmの円柱供試体を作製する。角柱モルタルは所定の試験材齢まで20℃で水中養生した。ただし、W/C100%の試験体に関しては水中養生不可であったため温度20℃湿度100%の気中養生を行った。

表-5.2 長さ変化、簡易凍結融解試験で使用した各モルタルの配合

	W/C(%)	活性アルミナ 粉末	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	活性アルミナ	細骨材	AE減水剤
50A0	50	0	4	246	493	0	1478	0
W60A0	60	0		281	469	0	1406	
W60A5		5		210	350	85	1050	
W65A5	65	5		227	349	86	1048	C×1.5%
W90A10	90	10		278	308	168	925	
W90A15		15		247	274	237	822	
W95A10	95	10		292	308	169	923	
W95A15		15		260	273	239	820	
W100A10	100	10		307	307	171	921	
W100A15		15		272	272	240	817	
W105A15	105	15		285	272	242	815	
W110A15	110	15		298	271	244	812	
W115A15	115	15		310	270	245	810	
W120A15	120	15		309	269	247	807	

#### 5.3.2 長さ変化試験

長さ変化試験は、JIS A 1129-2「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法：コンタクトゲージ法」に準じて行った。脱型後2週間水中養生したものを乾燥期間0日とし、計測を開始した。角柱供試体(40×40×160mm)を3本ずつ作製し、表面と裏面に、供試体左右端から30mmの位置に100mmの間隔でコンタクトチップを2枚貼り付け、測定のための標点とし、1供試体につき表面、裏面の2箇所の2点間の長さ変化を測定した。最小目盛1000分の1mmまで読み取り、各面について測る方向を変えて同じ2点間を計測し、2箇所2方向の平均を求めることで、精度向上を図った。各配合の計測値は、3本の平均値とした。供試体は室温20℃、相対湿度60%の環境下で保管し182日まで測定した。前回測定した収縮ひずみの差が全体の収縮ひずみの5%以下になった時、収縮は収束したものとみなす。

### 5.3.3 長さ変化試験結果

図-5.4 に長さ変化試験の結果の一例を示す。図-5.5 は配合ごとの材齢 182 日における長さ変化率を表している。W50A0 と W60A0 を比較すると、長さ変化率が W60A0 の方が約  $200\mu$  大きくなっている。これは、単位水量の増加が原因といえる。また、同じ W/C において W60A0 と W60A5 を比較すると約  $300\mu$  大きくなっている。これは、活性アルミナ粉末を 5% 混入したことで、モルタル内部に存在していた練り混ぜ水が吸収され、ポーラス化がより進んだためと考えられる。さらに W/C90% 以上では、W110A15 を除いて活性アルミナ粉末混入率に関わらず、長さ変化率は約  $2000\mu$  であった。違いは見られなかった。

以上の結果より、活性アルミナ粉末を 10% 以上混入したモルタルは、通常のモルタルの約 2 倍の長さ変化率を示すことが明らかとなった。また、長さ変化率の測定結果からひび割れが起きる可能性があったが、測定に使用した角柱供試体からひび割れは発生しなかった。

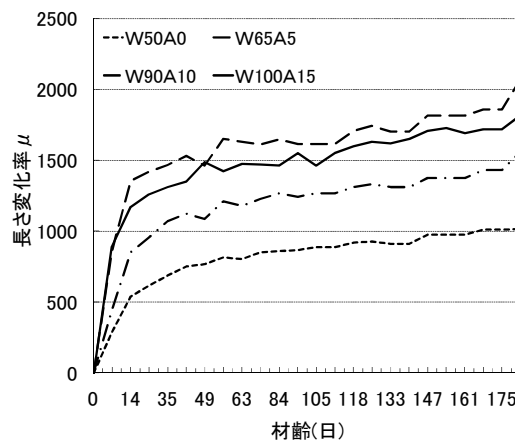


図-5.4 代表的な供試体の長さ変化率と材齢の関係

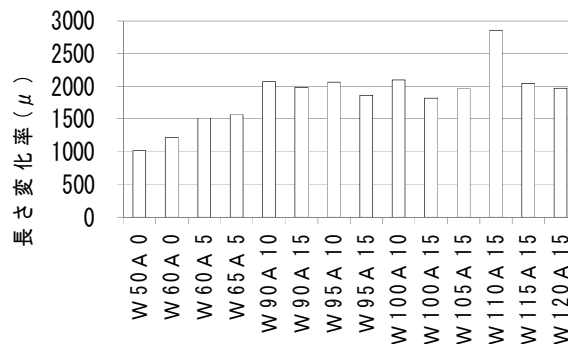


図-5.5 各配合の材齢 182 日における長さ変化率

## 5.4 簡易凍結融解試験概要

### 5.4.1 簡易凍結融解試験で使用したモルタルの配合

表-5.2にそれぞれのモルタルの配合を示す。配合は長さ変化試験で用いたうちの、各活性アルミナ粉末混入量の代表的なW50A0、W65A5、W90A10、W100A15と同じもので、供試体の形状は $\phi 10 \times 200\text{mm}$ の円柱とする。作製方法及び養生方法は5.3.1に示す。

### 5.4.2 簡易凍結融解試験

液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験を、既往の研究<sup>3-1)</sup>から以下の手順で行った。なお簡易急速凍結融解試験の1サイクルがJIS A 1148 (A法) の30サイクルに相当すると見なす。まず液化窒素用のバケツに、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を静かに投入し、液化窒素を数秒間吹き付ける。蓋をして30秒間底面を凍結させる。浸漬時間後、バケツから取り出し、お湯(約 $40^{\circ}\text{C}$ )に浸漬し、5分間融解させる。融解後、水分を拭き取り、凍結した底面から約 $15\text{mm}$ の位置に、超音波センサーをあて、距離 $100\text{mm}$ 間の超音波伝播時間を計測する。この作業を1サイクルとし、相対動弾性係数が60%以下になるか、サイクル数が10回に達した時点を試験終了とした。動弾性係数は、各試験で測定した超音波伝播時間を用いて以下の式により相対動弾性係数を求めた。

$$V = \sqrt{Ed / \rho} \quad (7)$$

$$\text{相対動弾性係数(\%)} = Ed_n / Ed_0 = (V_n / V_0)^2 = (T_0 / T_n)^2 \quad (8)$$

Ed : 動弾性係数(GPa)

VL : 超音波伝播速度(km/s)

T : 超音波伝播時間

Ed<sub>n</sub> : サイクル数n の超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

Ed<sub>0</sub> : 凍結融解試験の開始前に測定した超音波

伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)



図-5.6 簡易急速凍結融解試験装置

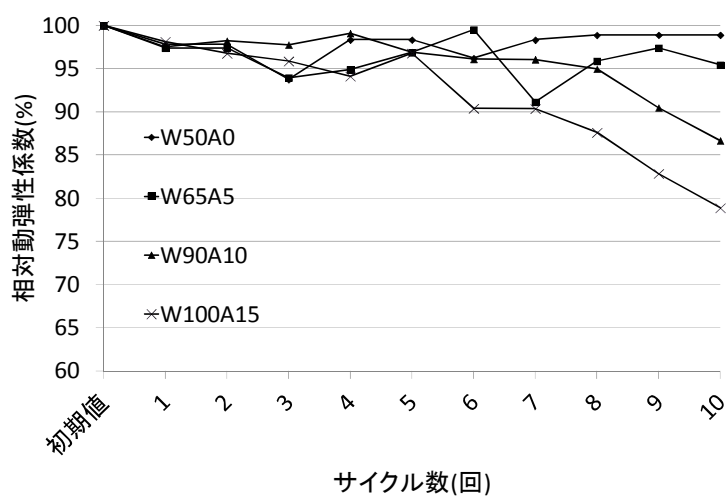


図-5.7 簡易急速凍結融解試験結果

### 5.4.3 簡易凍結融解試験結果

図-5.7に簡易急速凍結融解試験における結果を示す。10サイクルの時点において、全ての配合が相対動弾性係数 60%以上を保つ結果となった。簡易急速凍結融解試験における 10 サイクルが JIS 法の 300 サイクルと相関性がある<sup>3-2)</sup>ことから、活性アルミナ粉末混入モルタルは AE 剤を使用していないにも関わらず、通常の AE コンクリートと同等の耐凍害性を有するといえる。

## 5.5 結論

本章で得られた結果を示し、結論とする。

- (1) 活性アルミナ粉末を混入しても曲げ強度と C/W の比例関係に悪影響を及ぼすことはない。
- (2) W/C を大きくすることで、モルタルをポーラス化させ、モルタル内に多くの水分を供給させることができた。活性アルミナ粉末の混入率を上げることで吸水量の増加、水分の長期間保持能力を寄与させることができる。
- (3) 長さ変化試験により、活性アルミナ粉末を 10% 以上混入することで普通モルタルより約 2 倍の乾燥収縮を示すことが明らかになった。
- (4) 簡易急速凍結融解試験により、活性アルミナ粉末混入モルタルが、通常の AE コンクリートと同等の耐凍害性を有することを確認した。また、内部構造がポーラス化していることが明らかとなった。

## 参考文献

- 3-1) 橋本 紳一郎ほか：液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案，JCI 年次論文集，Vol.27，No.1，pp.757～762，2005.1.

## 6章 結論

本研究では、ヒートアイランド現象を抑制する保水性建材の性能を向上させるため、保水能力と気化熱による吸熱効果の効率を上げることを目的とし、実験を行った結果、次のような結論を得た。

### 6.1 3章の活性アルミナ粉末を使用したモルタルの温度上昇抑制効果の確認

- (1) 活性アルミナボールより活性アルミナ粉末を使用したモルタルの方が温度上昇抑制効果が高いことがわかった。
- (2) ハロゲンライト照射試験から平板供試体は気化熱による温度上昇抑制効果が働いていることが確認できた。
- (3) 照射試験の妥当性の検討から500wのハロゲンライトの熱エネルギーは平板に届くまでにほとんどのエネルギーが外部に拡散していることが分かった。

### 6.2 4章の温度上昇抑制効果を持つモルタルの実証試験と保水のメカニズムの確認

- (4) 活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は白色セメントモルタルの建屋に比べ建屋のコンクリートの温度及び建屋内部の温度も低くなり気化熱による温度抑制効果があることが分かる。
- (5) 6日間連続で測定したデータから活性アルミナ粉末を使った白色セメントモルタルの建屋は常に白色セメントモルタル建屋より温度が低くなっていることから、太陽からの熱量による含水の蒸発以外の含水量のロスを減らし性能を維持していることがわかる。
- (5) 細孔分布測定の結果から、総細孔量は、W/C と活性アルミナの量に比例して増加しており、モルタルのポーラス化が起こっていることが確認できる。
- (6) 走査型電子顕微鏡よりモルタルには、細孔が存在し、活性アルミナ粉末混入と含まないモルタルを比較した場合、空隙量が増えていることが確認できた。

- (7) 高 W/C のモルタルを作製するとき活性アルミナ粉末を混入しない場合は材料分離を起こす。よって、W/C ごとに施工に適した活性アルミナ粉末混入量を調整することで高 W/C であっても成形を可能になる。これは、活性アルミナ粉末を混入したことで材料分離が防がれ、微細な空隙が増加したためである。
- (8) 吸水高さ測定から、活性アルミナ粉末混入量および W/C の増加に伴い、吸上げ高さが高くなる。このことから、高 W/C 化および活性アルミナ粉末高混入率によって得られる内部空隙が連続していることが分かる。

### 6.3 5章の活性アルミナを混入したモルタルの耐久性の検討

- (9) 曲げ強度試験より、材齢が経過するに従ってセメント水和反応によって強度が増進していることから、活性アルミナ粉末を混入しても曲げ強度とC/Wの比例関係に悪影響を及ぼすことはないことがわかる。
- (10) 長さ変化試験により、活性アルミナ粉末を10%以上混入することで普通モルタルより約2倍の乾燥収縮を示すことが明らかになった。
- (11) 簡易急速凍結融解試験により、活性アルミナ粉末混入モルタルが、通常のAEコンクリートと同等の耐凍害性を有することを確認した。また、内部構造がポーラス化していることが明らかとなった。



#### 6.4 今後の展望と課題

本研究より、保水性建材の問題点であった吸水した水分の蒸発速度の低減に十分な性能を有することが確認できる。普通のコンクリートに比べヒートアイランド現象の抑制に十分な効果があり、モルタルとして普通コンクリートに5mmほどの厚みで塗るだけで、保水性建材として使えることも確認した。

以上の結果から、活性アルミナを混入したモルタルは十分な遮熱性能を有していることがわかる。また、研究過程で、いくつかの現象が見られた。一つは、モルタルのポーラス化により、コンクリートの表面にコンクリート内部の水が放出され白華現象が起きているモルタルがあった。次に、コンクリートの中性化が起きやすくなる。これもポーラス化が原因でコンクリート内部の水が吸放出を繰り返すためコンクリートのアルカリ成分が外部に流出してしまう。また、コンクリートの中性化が進むため、カビが発生しやすくなる。

活性アルミナの入手方法についても考える必要がある。活性アルミナは水酸化アルミニウムを焼成することで得ることができるが、焼成するのに時間がかかる。アルミナは断熱性能が高いため、熱の伝わりが遅く、実験で使用した活性アルミナも水酸化アルミニウムを耐熱皿に薄さ30mm入れて6時間焼成に時間をかけている。もし、大量に生産することになると水酸化アルミニウムを容器に入れて焼成する場合薄さ30mm以上にすると、焼成時間も6時間を超えるため、電気代がかかりコストが増える。次に、活性アルミナ粉体は粒径が40 $\mu\text{m}$ ~60 $\mu\text{m}$ で非常に小さいので、練り混ぜが難しい問題がある。製作時に粉塵が舞う、モルタルを機械で量産する時の調整が難しいなどの問題もある。

開発した活性アルミナ混入モルタルは、ヒートアイランド現象問題の地表面被覆の人工化を解決する能力を持っているが施工場所を選ぶ必要がある。

地表面被覆の人工化の対策としては緑化がある。図-6.1はヒートアイランド現象対策の構造物の写真である。活性アルミナ混入モルタルはこの緑化の代わりとして使用できる。ビルの屋上に緑化を施工する屋上緑化は、ビルの屋上に土や木を植えるため大きな重量がかかり、屋上に負担を与える問題がある。そこで、屋上緑化の代わりに活性アルミナ混入モルタルを使用することで屋上の重量の問題を解決できる。また、モルタルを壁に塗ることで壁面緑化の代わり



屋上緑化



壁面緑化



保水性舗装

図-6.1 ヒートアイランド現象対策の構造物

として使用できる。温度管理が必要な建物に塗ることでエアコンの電気代を削減することも可能である。

東京の新橋駅西口に気化熱を利用した舗装道路がある。この舗装道路は人工的に水を地面から供給させるタイプのものである。そのため、定期的なメンテが必要になりコストがかかる問題がある。活性アルミナを混入したモルタルを舗装道路として使用する場合は、定期的なメンテは必要ない。ただし、モルタルは空隙があるので、摩耗が起きやすい点があり耐摩耗用のモルタル配合を作成する必要がある。

このように保水性舗装は、耐久性の面から施工場所に制約を受けるため、2005年以降、施工面積が減少傾向にある。ただし、公園等、耐久性は求められない

が舗装が必要な場所には向いている。

一方、保水性建材として使う場合は、汚れやすく、特に灌水タイプでは苔などが付着し、定期的な清掃が必要となる。ベランダ用の建材では、「水はけのよさ」「裸足で歩いても熱くないこと」といった性能が評価されている。

以上より、本研究の成果は、ヒートアイランド現象対策として貢献できるものと言えるが、本研究のみでは、データとして十分とは言えず、今後は実構造物レベルでの施工も含めてデータを蓄積することで、より信頼性の高い製品を作成できるものと考えられる。図-6.1はヒートアイランド現象対策の構造物の写真である。活性アルミナ混入モルタルを使うことで代替効果が期待でき今後の研究テーマとして進めたい。

## 謝辞

本論文は、徳島大学教授橋本親典博士のご指導のもと、筆者が徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学 博士後期課程の在学中に行った研究と、環境資材株式会社の共同研究の成果をとりまとめたものです。

本研究を遂行するにあたり、多大なるご指導、ご助言をいただきました徳島大学工学部建設工学科コンクリート工学研究室、橋本親典教授、渡辺健准教授、に深く感謝致します。また材料調達から実験の補助まで、広きに渡りご指導頂きました技術職員の石丸啓輔氏にも重ねて深く感謝致します。また、退職された水口裕之名誉教授、維持再生工学研究室の上田隆雄教授には、適切な御助言、御指導を頂き誠にありがとうございました。

学位論文審査の労をとって頂きました徳島大学教授橋本親典教授、上田隆雄教授、上月康則教授には、貴重なご示唆とご支援を頂きました。改めて厚く御礼申し上げます。

さらに、実験やデータ整理等において御協力頂いた徳島大学大学院生の坂本健君、弓場上有紗さん、親切にご指導頂きました徳島大学大学院生の皆様にも深く感謝致します。

最後になりましたが、コンクリート工学研究室4年生の皆様、現維持再生工学研究室の皆様にも様々な面でご協力いただき、本当にありがとうございました。